



Diogo Miguel Sobral Ribeiro

Licenciatura em Ciências da Engenharia Electrotécnica
e de Computadores

Previsão de Ocupação em Habitações através dos Níveis de Dióxido de Carbono

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e Computadores

Orientador: João Francisco Alves Martins,
Professor Doutor, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso, FCT/UNL

Arguente: Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, FCT/UNL

Vogal: Doutor João Francisco Alves Martins, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

Previsão de Ocupação em Habitações através dos Níveis de Dióxido de Carbono

Copyright © Diogo Miguel Sobral Ribeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work.”

Thomas A. Edison

Agradecimentos

Primeiro que tudo gostaria de agradecer a toda a minha família pelo apoio incondicional que sempre me deram ao longo desta jornada da minha vida.

Ao meu orientador Professor João Martins, por mesmo nas dificuldades me ajudar a ver o rumo.

A todos os meus amigos por estarem sempre lá para tudo o que fosse preciso.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia e ao Departamento de Engenharia Electrotécnica por todos momentos e conhecimentos adquiridos.

E por ultimo á pessoa mais importante na minha vida, á minha namorada Mané por acreditar sempre em mim e me apoiar nos momentos difíceis com todas as suas forças.

Resumo

Cada vez mais a preocupação ambiental tem ditado o rumo das abordagens escolhidas nas mais variadas áreas, quer pela redução de desperdícios, quer pelo aumento da eficiência dos mais diversos processos. Quando olhamos para os consumos energéticos a nível mundial os edifícios são responsáveis por uma grande fatia destes consumos fazendo deles um dos grande ponto de interesse para implementação de sistemas que visem diminuir os consumos, permitindo assim tentar alcançar um equilíbrio sustentável entre o meio ambiente e o nosso conforto.

A variável humana tem-se mostrado cada vez mais importante no desenvolvimento de ferramentas que venham permitir alcançar este objetivo, quer por via de reduções nos consumos através da remoção dos fatores de desperdício de energia, quer pelo aumento de eficiência dos sistemas utilizados nas habitações, desde a iluminação à climatização. É então importante poder ter formas de conhecer qual o comportamento humano no edifício para que possam ser criadas abordagens cada vez mais eficientes e que possam contar com melhores variáveis de entrada aumentado assim, ainda mais o seu desempenho.

Na presente dissertação será feito o estudo da validade do uso do dióxido de carbono como variável de inferência para o nível de ocupação das várias divisões de um edifício de habitação. Para tal implementou-se um sistema de análise dos valores de dióxido de carbono da habitação através de módulos sem fios colocados em locais estratégicos que fornecerão informação ao algoritmo para que possa ser criado um mapa de ocupação. O dióxido de carbono mostrou-se capaz de fornecer informação da ocupação no entanto apresentando uma incerteza moderada devido a fatores como os deslocamentos de ar na habitação.

Palavras-chave: Ocupação, Eficiência, Dióxido de Carbono, Edifícios inteligentes, Previsão

Abstract

Increasingly environmental concerns have dictated the course of the approaches chosen in various areas, either by reducing waste or by increasing the efficiency of different processes. When we look at the energy consumption globally, buildings contribute with a large share of these consumption making them one of the great point of interest for the implementation of systems aimed to reduce energy consumption, thus trying to achieve a sustainable balance between the environment safety and human comfort.

The human variable has been increasing its importance in the development of tools that may help to achieve this goal, either through reductions in consumption by helping remove the power wasting factors or by increasing efficiency of home systems like light or climate. It is then important to be able to know human behaviors in the buildings so more efficient approaches can be created and with better input variables have further performance.

The present work will be done with the objective of study the validity of carbon dioxide when used as inferential variable for the level of occupancy of the various rooms of a residential building, it is therefore implemented a system of analysis of carbon dioxide values acquired via wireless modules placed in strategic locations that will provide information to an algorithm created to elaborate an occupancy map. Carbon dioxide was shown to be able to provide occupancy information yet presenting a moderate uncertainty due to factors such as air shifts in the habitation.

Keywords: Occupancy, Efficiency, Carbon dioxide, Smart buildings, Prevision

Acrónimos

RFID - Radio-Frequency Identification (Identificação por radiofrequência)

IP - Internet Protocol

KNN - *K-nearest neighbour*

SCM' - Support Vector Machine

RNA - Rede Neuronal Artificial

HMM - Hidden Markov Model

API - Application programming interface (Interface de programação de aplicações)

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

ADC - Conversor analógico-digital

AVAC - Aquecimento, ventilação e ar condicionado

Índice

ACRÓNIMOS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XIX
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 MÉTODO E ESTRUTURA.....	3
ESTADO DA ARTE	5
2.1 MÉTODOS DE INFERÊNCIA EXISTENTES PARA ESTIMAR A OCUPAÇÃO DE EDIFÍCIOS.....	5
2.1.1 <i>Métodos diretos</i>	5
2.1.2 <i>Métodos Indiretos</i>	7
2.2 UTILIZAÇÃO DE CO ₂	8
2.2.1 <i>Sensores químicos</i>	9
2.2.2 <i>Sensores de CO₂ de infravermelhos não dispersivos ou NDIR</i>	10
2.3 INFERÊNCIA COM BASE EM CO ₂	11
IMPLEMENTAÇÃO	13
3.1 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA	13
3.2 MATERIAL UTILIZADO	14
3.3 DESENVOLVIMENTO DOS MÓDULOS	16
3.3.1 <i>Módulos Remotos</i>	16
3.3.2 <i>Módulo local</i>	17
3.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	18
3.5 COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE REDE ZIGBEE MESH	24

3.6	FLUXOGRAMA DO ARRANQUE DA REDE DE RECOLHA.....	27
3.7	ESTRUTURA DE DADOS.....	28
3.8	DETEÇÃO DE PRESENÇA OU CONTAGEM DE PESSOAS.....	30
3.9	INFERÊNCIA DE OCUPAÇÃO	30
3.10	FATORES COM INFLUÊNCIA NAS MEDIÇÕES	34
3.11	INTERFACE DO SISTEMA.....	35
ANÁLISE DE RESULTADOS		39
4.1	ENTRADA E SAÍDA DE PESSOAS NA DIVISÃO	39
4.2	VELOCIDADE DE AUMENTO DO CO ₂	40
4.3	TRANSFERÊNCIAS DE CO ₂ ENTRE DIVISÕES PRÓXIMAS.....	42
4.4	PREVISÃO EM CONDIÇÕES REAIS	44
4.4.1	<i>Escritório de 13 a 19 Junho.....</i>	<i>47</i>
4.4.2	<i>Sala de 13 a 19 Junho</i>	<i>48</i>
4.4.3	<i>Cozinha de 13 a 19 Junho.....</i>	<i>49</i>
4.4.4	<i>Escritório de 24 Junho a 30 Junho</i>	<i>50</i>
4.4.5	<i>Sala de 24 Junho a 30 Junho</i>	<i>51</i>
4.4.6	<i>Cozinha de 24 Junho a 30 Junho</i>	<i>52</i>
4.4.7	<i>Análise dos períodos semanais.....</i>	<i>53</i>
4.4.8	<i>Dados cumulativos.....</i>	<i>54</i>
4.5	RELAÇÃO OCUPAÇÃO CONSUMO ELÉTRICO	55
CONCLUSÕES		61
BIBLIOGRAFIA		65

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM SENSOR DE CO ₂ BASEADO NA TECNOLOGIA NDIR [17].....	10
FIGURA 3.1 ESQUEMA BASE DO SISTEMA DE ANÁLISE DE OCUPAÇÃO COM BASE NO CO ₂	15
FIGURA 3.2 ESQUEMA DE MONTAGEM DO REGULADOR LM3940.....	16
FIGURA 3.3 MÓDULO REMOTO	17
FIGURA 3.4 SISTEMA LOCAL COM XBEE.....	18
FIGURA 3.5 CURVA CARACTERÍSTICA DO SENSOR MQ-135.....	19
FIGURA 3.6 CURVA CARACTERISTICA DO SENSOR MQ-135 REFERNTE AO CO ₂	20
FIGURA 3.7 EXEMPLO DA TOPOLOGIA DE UMA REDE ZIGBEE MESH	25
FIGURA 3.8 FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE RECOLHA DE DADOS.....	27
FIGURA 3.9 ESTRUTURA DE DADOS SEMANAL.....	28
FIGURA 3.10 ESTRUTURA VISUAL DOS DADOS AO LONGO DO DIA.....	29
FIGURA 3.11 EXEMPLO DE TENDÊNCIA DECRESCENTE COM VARIAÇÃO	32
FIGURA 3.12 EXEMPLO TENDÊNCIA DECRESCENTE CONSTANTE.....	33
FIGURA 3.13 INTERFACE DO PROGRAMA	36
FIGURA 4.1 NÍVEIS DE CO ₂ DURANTE O PERÍODO DE OCUPAÇÃO DA DIVISÃO, RETÂNGULO A VERDE PERÍODO DE OCUPAÇÃO	39
FIGURA 4.2 OCUPAÇÃO REAL E PREVISTA PELO ALGORITMO.....	40
FIGURA 4.3 PERFIL DE CO ₂ , DIVISÃO COM 40 m ³ , UMA PESSOA NO INTERIOR.....	41
FIGURA 4.4 PERFIL DE CO ₂ , DIVISÃO COM 30 m ³ , UMA PESSOA NO INTERIOR.....	41
FIGURA 4.5 TROCA GASOSA ENTRE QUARTOS PRÓXIMOS.....	42
FIGURA 4.6 OCUPAÇÃO DO QUARTO COM O MÓDULO REMOTE	43
FIGURA 4.7 PLANTA REPRESENTATIVA DA HABITAÇÃO EM ANÁLISE.....	45
FIGURA 4.8 NÍVEL CO ₂ ESCRITÓRIO (LOCAL), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	47
FIGURA 4.9 OCUPAÇÃO ESCRITÓRIO (LOCAL), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	47

FIGURA 4.10 NÍVEL CO ₂ SALA (REMOTE), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	48
FIGURA 4.11 OCUPAÇÃO SALA (REMOTE), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	48
FIGURA 4.12 NÍVEL CO ₂ COZINHA (REMOTE1), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	49
FIGURA 4.13 OCUPAÇÃO COZINHA (REMOTE1), 13 (SÁBADO) A 19 (SEXTA-FEIRA) JUNHO	49
FIGURA 4.14 NÍVEL CO ₂ ESCRITÓRIO (LOCAL), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	50
FIGURA 4.15 OCUPAÇÃO ESCRITÓRIO (LOCAL), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	50
FIGURA 4.16 NÍVEL CO ₂ SALA (REMOTE), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	51
FIGURA 4.17 OCUPAÇÃO SALA (REMOTE), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	51
FIGURA 4.18 NÍVEL CO ₂ COZINHA (REMOTE1), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	52
FIGURA 4.19 OCUPAÇÃO COZINHA (REMOTE1), 24 (QUARTA-FEIRA) A 30 (TERÇA-FEIRA) JUNHO	52
FIGURA 4.20 OCUPAÇÃO TERÇA-FEIRA, UMA SEMANA DE DADOS, SALA (REMOTE).....	54
FIGURA 4.21 OCUPAÇÃO TERÇA-FEIRA, QUATRO SEMANAS DE DADOS, SALA (REMOTE).....	54
FIGURA 4.22 OCUPAÇÃO TERÇA-FEIRA, 4 SEMANAS ACUMULADAS, COZINHA (REMOTE1)	56
FIGURA 4.23 OCUPAÇÃO TERÇA-FEIRA, 4 SEMANAS ACUMULADAS, SALA (REMOTE)	56
FIGURA 4.24 OCUPAÇÃO TERÇA-FEIRA, 4 SEMANAS ACUMULADAS, ESCRITÓRIO (LOCAL)	57
FIGURA 4.25 OCUPAÇÃO TOTAL DA HABITAÇÃO A UMA TERÇA-FEIRA	57
FIGURA 4.26 CONSUMO DA HABITAÇÃO DURANTE UMA TERÇA-FEIRA, A VERMELHO, ZONAS DE CONSUMO EXTERNO À CASA	58
FIGURA 4.27 CONSUMO INTERNO DA HABITAÇÃO COM MÉDIA MÓVEL APLICADA	59
FIGURA 4.28 MÉDIA MÓVEL DA OCUPAÇÃO DA HABITAÇÃO	59
FIGURA 4.29 CORRELAÇÃO ENTRE A OCUPAÇÃO E O CONSUMO	60

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 CONJUNTO DE DADOS OBTIDOS AO AR LIVRE	22
TABELA 3.2 VALOR DE RO PARA OS VÁRIOS SENSORES MQ-135	22
TABELA 3.3 EXEMPLO DE FRAME USADA PARA LEITURA REMOTA	26
TABELA 3.4 LISTA DE CARACTERÍSTICAS DOS VALORES DE CO ₂	34

Capítulo 1

Introdução

Cada vez mais a necessidade de reduzir os consumos de energia é maior, quer por razões de ordem monetária como de ordem ambiental. Um dos métodos de atingir mais facilmente este objetivo prende-se com o aumento da eficiência das infraestruturas já implantadas, bem como daquelas que serão futuramente construídas. A eficiência energética pode ser ainda vista como uma nova forma de produção de energia sem que haja necessidade de criar novas infraestruturas ou aumentar os níveis de consumo dos vários combustíveis fósseis, combustíveis esses, utilizados atualmente na produção de energia elétrica nas grandes centrais termoelétricas. [1]

Com as atuais políticas prevê-se um aumento do consumo elétrico em cerca de 37% em 2040, uma média de crescimento de aproximadamente 1,1% ao ano. Quando comparada a última década com as décadas anteriores, é possível observar um decréscimo da percentagem de aumento dos consumos, muito por haver um maior foco a nível económico em atividades não tão exigentes a nível energético, devido à atual crise mundial. [1] No entanto os edifícios continuam a ser um dos grandes consumidores de energia sendo responsáveis por aproximadamente um terço do consumo elétrico a nível mundial, sendo portanto um dos importantes focos a ter em conta quando se pretende reduzir os consumos elétricos tanto por razões ambientais como por razões económicas. [2]

Quando analisado o caso de Portugal em concreto tem-se um consumo elétrico dos edifícios correspondente a 28% da energia final no ano de 2011, cerca de 16,6% correspondente ao sector residencial e 11,4% ao sector dos serviços. Trata-se assim de uma grande fatia do consumo nacional energético sendo que o aumento da eficiência energética nos sectores residenciais e dos serviços tem um grande impacto ao nível dos consumos totais do país. [3]

O controlo da produção e do consumo é uma grande mais-valia nesta demanda e a existência de sistemas que possam conseguir informação de forma barata e não intrusiva dos comportamentos humanos podem ser grandes aliados na implementação de sistemas mais avançados e robustos de distribuição e uso de energia, ajudando assim a detetar pontos com possibilidade de redução de consumo para que possam ser tomadas medidas proactivamente. [4]

Existe desde há vários anos, um esforço para desenvolver ferramentas que permitam prever os consumos energéticos de edifícios e algumas das novas estratégias têm em conta uma variável que anteriormente foi de certa forma ignorada, o comportamento humano e o seu envolvimento nas variações dos consumos do edifício. No entanto esta variável é de difícil modelização pois o comportamento humano está dependente dos mais variados fatores, desde fatores meteorológicos a organizacionais e que afetam diferentes indivíduos de distintas formas, sendo portanto importante para uma melhor previsão dos consumos elétricos a capacidade de conhecer pelo menos a presença ou não de indivíduos nos vários espaços do edifício. É assim necessário encontrar novas formas de inferir a presença de pessoas, de uma forma o menos intrusiva possível e sem ter de fazer alterações de maior ao espaço. [5, 6]

Com uma previsão dos consumos precisa é então possível estudar métodos de diminuição destes quer através de novas estratégias de gestão dos espaços ao nível dos equipamentos, bem como através da sensibilização dos seus utilizadores no que diz respeito aos seus hábitos, para que possa ser atingida uma utilização ótima do espaço utilizando a menor quantidade de energia possível.

1.1 Motivação

Conseguir ter conhecimento da ocupação de um edifício de forma o mais exata possível permite obter previsões mais exatas dos consumos levando a que sejam criadas novas abordagens com o objetivo de fazer a sua gestão e até mesmo reduzi-los. Estas reduções vêm trazer mais-valias tanto ao comercializador, como ao consumidor e ainda mais para o meio ambiente.

Com toda a energia que é por vezes desperdiçada nos mais diversos edifícios, quer de residência própria, quer edifícios públicos com gestões que por vezes não prestam a devida importância à questão da eficiência, é então importante conseguir criar novas abordagens de fácil implementação para que as várias metas de reduções de consumo possam ser atingidas de uma forma mais rápida e com o menor custo para o nível de conforto dos vários utilizadores dos edifícios, quer sejam eles habitações ou locais de trabalho, como escritórios e afins.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação visa a criação de um sistema de previsão da ocupação de um edifício de habitação através da monitorização dos níveis de dióxido de carbono, sendo estes utilizados como variável de inferência da ocupação.

Para que este objetivo seja cumprido é necessário efetuar um conjunto de passos que vêm então permitir chegar ao objetivo final, obter a ocupação da habitação, o que permitirá em futuras abordagem criar sistemas de previsão dos consumos elétricos mais exatos, mais baratos e de maior facilidade de acesso.

Será desenvolvido um sistema para obtenção dos dados de CO₂ provenientes das várias divisões e posteriormente criado um sistema informático que permita efetuar o tratamento destes dados e extrair as informações necessárias para o correto funcionamento de todo o sistema.

1.3 Método e Estrutura

Esta dissertação seguirá a seguinte abordagem: Numa primeira fase será feito um estudo dos vários métodos de inferência da ocupação de edifícios e as suas abordagens com especial foco na utilização de CO₂ para este fim, em seguida é feita a descrição do processo de criação de todo o sistema de monitorização com base no CO₂ bem como do sistema para inferir a presença de pessoas no edifício. Com o sistema já implementado, é feita a análise dos vários testes e casos que foram efetuados de forma a validar o comportamento do sistema. Por fim é feita uma exposição dos pontos a melhorar bem

como de possíveis novas abordagens futuras no que diz respeito à temática, com especial atenção nas possíveis utilizações que um sistema com estas características pode ter.

Capítulo 2

Estado da arte

Existem atualmente diversos métodos que permitem obter informação sobre a ocupação de edifícios. Cada um deles permite atingir o mesmo fim no entanto diferenciam-se entre si ao nível de custos, exatidão, complexidade e até mesmo ao nível da intrusão na privacidade das pessoas que se encontram nos locais. Alguns deles utilizam metodologias diretas através do envolvimento das pessoas no processo de inferência como é o caso dos cartões de acesso, enquanto outros fazem uso de variáveis presentes no edifício, como é o caso do dióxido de carbono.

De forma a ser possível expor mais claramente os diferentes métodos de inferência da ocupação dos edifícios, foi feita uma divisão destes em métodos diretos e indiretos, de forma a tornar mais clara a exposição da informação.

2.1 Métodos de inferência existentes para estimar a ocupação de edifícios

2.1.1 Métodos diretos

Embora nesta categoria estejam contidos os vários métodos que vêm permitir maior exatidão no que diz respeito ao número de pessoas e qual a sua localização e identidade também vêm introduzir um problema da invasão de privacidade dos utilizadores, que quando levantado pode ser um entrave no que diz respeito à disseminação deste tipo de sistemas.

2.1.1.1 Algoritmos de reconhecimento de vídeo

Este método faz uso de câmaras de vídeo para obter a informação do número de pessoas e até mesmo das suas identidades, interferindo assim com a privacidade destas devido à sua natureza intrusiva. É um sistema com uma grande complexidade computacional associada e de difícil escalabilidade. Um dos algoritmos já existentes consiste unicamente na localização das cabeças das várias pessoas na imagem permitindo assim proceder à contagem, no entanto o processo exige diversas fases de preparação, como a remoção dos fundos e segmentação da imagem. [7]

Além do uso de câmaras dedicadas ao efeito é também possível o uso de sistemas de videovigilância ou vulgarmente chamados CCTV (*Closed-circuit television*) já existentes no edifício, baixando os custos inerentes a este tipo de sistema, no entanto esta abordagem está associada a um aumento do nível de complexidade e diminuição do nível de precisão devido à fraca qualidade de imagem que este tipo de sistema de vídeo vigilância apresenta. [8]

2.1.1.2 Localização por Tags

Este método consiste no uso de pequenas Tags, que comunicam com diversos leitores colocados em posições estratégicas, permitindo assim saber a localização das mesmas relativamente ao espaço. O processo de comunicação é feito habitualmente através de RFID. Este método está dependente do cumprimento das pessoas, pois existe a necessidade de cada uma se fazer acompanhar sempre da Tag para que o sistema seja fiável, no entanto quando satisfeitos todos os requisitos é um método que permite saber o número de ocupantes de forma exata, qual a sua identidade e localização. No entanto quando se trata de um edifício com grande número de visitantes este tipo de abordagem torna-se pouco prática e de difícil execução. [9]

2.1.1.3 Cartões de acesso

Já em uso em diversos ambientes empresariais e industriais como forma de acesso aos diferentes pontos de edifícios, quando acoplado a um sistema que monitorize as várias interações dos cartões pessoais de cada um dos indivíduos é possível fazer uma contagem do número de pessoas que se encontram nas diversas salas de forma precisa.

Os cartões podem possuir diferentes tecnologias mas a base principal do funcionamento é a passagem do cartão num dos múltiplos leitores que se encontram espalhados pelo edifício ou à sua entrada. À semelhança do método das Tags, este sistema necessita que seja cedido um cartão a cada novo visitante do edifício o que por vezes, em termos logísticos, não é de fácil execução quando se está perante grande número de pessoas. [9]

2.1.2 Métodos Indiretos

Neste conjunto de métodos para inferência da presença de pessoas em edifícios as variáveis que são usadas não estão dependentes diretamente de ações destas para que possa ser obtida informação. No entanto por vezes apresentam menor exatidão comparativamente às abordagens referidas anteriormente nos métodos diretos. [10]

2.1.2.1 *Método sonoro*

O uso de microfones permite a inferência da ocupação de uma divisão com base na voz ou ruído produzido, no entanto ambientes naturalmente ruidosos como por exemplo fábricas não permitem o uso do som como método de deteção, devido ao ambiente ruidoso que por vezes mesmo através do uso de algoritmos não é possível contornar.

2.1.2.2 *Métodos baseados em redes de comunicação sem fios*

O uso de sistemas com base nas redes Wi-Fi nome vulgar do protocolo IEEE 802.11 já existentes é outra das possibilidades para inferir quanto à presença de pessoas em edifícios e até mesmo uma estimativa do valor quantitativo. Este método é normalmente implementado através da monitorização dos IPs atribuídos aos vários dispositivos ligados à rede. Este método é bastante conveniente pois não implica novo hardware, no entanto exige que os indivíduos necessitem de ter os seus dispositivos ligados a rede do edifício, sendo isto problemático no caso de pessoas estranhas ao edifício ou em caso de existirem medidas de segurança apertada ao nível dos sistemas informáticos do edifício. [11, 12]

2.1.2.3 Sensor infravermelho passivo

Este método funciona com base na leitura de variações na quantidade de radiação infravermelha emitida no campo de visão do sensor. Este tipo de sensor é normalmente usado em espaços pequenos, sendo portanto ideal para zonas interiores dos edifícios mas não só. Estes sensores são bastante fiáveis não sendo normalmente gerados falsos disparos o que os torna uma das opções mais utilizadas atualmente. O seu consumo de energia pode ser considerado desprezável e são geralmente bastante baratos. Existe já uma grande proliferação deste tipo de sensores para controlo de sistemas de iluminação automático dos mais variados tipos de edifícios. [7]

2.1.2.4 Consumo elétrico

Através do uso de contadores inteligentes é possível obter de forma detalhada os consumos do edifício e a partir daí tirar conclusões sobre a ocupação deste. Várias técnicas podem ser aplicadas, desde simples algoritmos de *Threshold* em que a partir de um determinado limite de potência é assumido que existem pessoas no edifício como referido em [13] ou mesmo métodos mais avançados como reportado em [14] fazendo uso de classificadores como *Support vector machines (SVM)*, ou *K-nearest neighbour (KNN)*, com precisões da ocupação a rondar os 80%.

2.2 Utilização de CO₂

O dióxido de carbono é um gás incolor e inodoro que quando inalado em concentrações muito mais altas que as atmosféricas pode deixar um gosto amargo na boca. Não é um composto inflamável e não ajuda em processos de combustão da grande maioria das substâncias por já se tratar de um dos seus produtos. A sua densidade é cerca de 1,5 vezes maior do que a do ar, fazendo com que se acumule na superfície do chão quando em espaços fechados e com fraca movimentação de ar.

O dióxido de carbono existe naturalmente na natureza e é produzido por todos os animais durante o processo de respiração surgindo como um subproduto do seu metabolismo. Este gás é também gerado pela queima de combustíveis provenientes de origem fóssil ou de matéria vegetal, com fortes ligações às indústrias da energia e dos transportes. [15]

No que diz respeito à inferência da ocupação de um edifício não existem quase sistemas que sejam unicamente baseados em medições de CO₂. No entanto é possível encontrar diversos métodos baseados em aglomeração de múltiplos dados provenientes de diferentes tipos de sensores, técnica esta normalmente referida como fusão de sensores (*sensor fusion*), para conseguir obter a ocupação do edifício. Existe também já alguma proliferação de sistemas de controlo de qualidade do ar que têm também por base sensores de CO₂, no entanto, o sistema não tem como objetivo conhecer a quantidade de pessoas no edifício para proceder ao controlo dos vários sistemas de condicionamento de ar mas sim se os vários parâmetros que devem compor um bom ambiente se encontram dentro do intervalo de valores correto, sendo o CO₂ um deles. [16]

No que diz respeito aos métodos de quantificação de CO₂ existem dois tipos principais de sensores que permite saber os níveis de dióxido de carbono no ar, sendo eles:

2.2.1 Sensores químicos

Estes sensores são normalmente aqueles que se encontram mais abaixo no espectro de custo, pois são relativamente simples de serem fabricados, no entanto os valores que permitem obter não são os mais precisos. Os sensores deste tipo têm normalmente como base um polímero ou (hetero-)polisiloxano, tendo uma das aplicações comerciais existentes a seguinte estrutura:

Micro tubo em cerâmica Al₂O₃ e uma camada de dióxido de estanho (SnO₂)

A presença de CO₂ junto da camada de dióxido de estanho vai então desencadear uma variação na sua resistência que será usada para obter os níveis de CO₂ presentes no meio gasoso envolvente.

2.2.2 Sensores de CO₂ de infravermelhos não dispersivos ou NDIR

O funcionamento deste sensor tem por base a emissão de luz infravermelha através do interior de uma câmara com ar em direção a um sensor infravermelho que se encontra na outra extremidade da câmara. Este sensor tem como função medir a quantidade de radiação infravermelha que o atingiu. A luz ao passar pelo interior do tubo, Figura 2.1, vai ser absorvida pelas moléculas que possuam o mesmo tamanho que o comprimento de onda respetivo, deixando passar os outros comprimentos de onda. O resto da luz vai então embater no filtro ótico que vai absorver todos os comprimentos de onda à exceção do comprimento de onda que é absorvido pelo CO₂. Por fim, o detetor que se encontra no final do tubo vai ler a quantidade de luz que não foi nem absorvida pelo CO₂ nem pelo filtro ótico. É então feita a diferença entre a quantidade de luz radiada pela fonte de infravermelhos e a medida pelo detetor. Esta diferença vai ser proporcional ao número de moléculas de CO₂ que se encontram no ar que está dentro da câmara sendo assim possível saber o número de partes por milhão de CO₂ de forma exata.

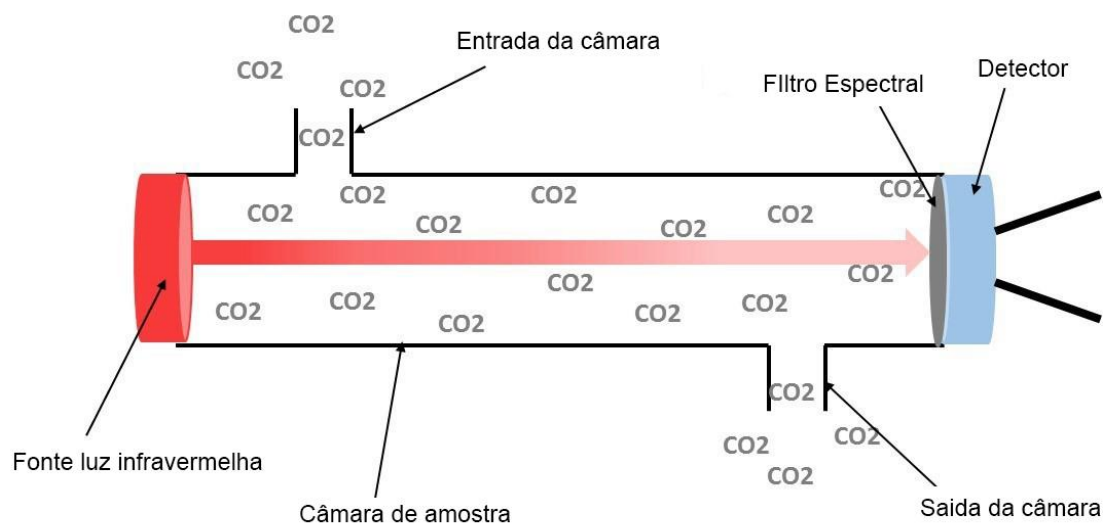


Figura 2.1 - Ilustração do funcionamento de um sensor de CO₂ baseado na tecnologia NDIR [17]

Este tipo de sensor tem uma elevada precisão no entanto o seu custo é muito mais elevado que o dos sensores baseados em processos químicos, a sua vida útil é

geralmente maior e são de maior fiabilidade sendo muito mais indicados para casos em que a precisão dos valores obtidos seja de grande importância. [17]

2.3 Inferência com base em CO₂

Na grande maioria dos estudos realizados até agora apenas com base nos níveis de CO₂ estes tendem a manter o maior número de condições sob controle de forma a serem obtidos resultados de uma forma controlada e com valores satisfatórios, no entanto o CO₂ como variável de inferência apresenta diversos problemas como seja os atrasos existentes até serem observadas alterações, com valores de 10 a 20 minutos, como referido em [18]. Existem também um grande número de variações que podem vir das mais diversas fontes como correntes de ar geradas por janelas ou portas abertas, sistemas de condicionamento de ar com extração e introdução de ar no edifício, entre outros pontos de troca de ar com o exterior [18].

Um dos principais pontos de interesse na utilização de CO₂ vem do uso de abordagens multisensor como apresentado em [19], este estudo teve como base uma situação muito específica, nomeadamente uma secretária de um pequeno escritório, com a grande maioria dos sensores colocados em torno do único possível ocupante do espaço sendo os resultados pouco representativos em casos em que a localização exata dos ocupantes não é conhecida. O CO₂ fez então parte de um conjunto de variáveis utilizadas por uma árvore de decisão para classificar o nível de ocupação, no entanto segundo os resultados obtidos, o CO₂ foi aquele que apresentou uma das prestações mais baixas para conseguir detetar a ocupação da divisão, com os consumos elétricos locais e os detetores de infravermelhos a serem aqueles que melhor prestação apresentaram. Mesmo quando usados vários sensores em conjunto, nomeadamente luminosidade, CO₂ e som não foi possível obter maior precisão do que aquela que nos é fornecida por um sensor de movimento, sendo no entanto uma diferença mínima de 0,22%. [19]

Quando considerados espaços de maiores dimensões, o CO₂ tem no entanto uma melhor prestação com visto em [20]. Neste caso o ambiente em estudo tem uma configuração sob a forma de um escritório amplo, sem divisões e com cinco trabalhadores a tempo inteiro. Relativamente a este foram estudados diversos métodos de *machine learning* (aprendizagem automática) aplicados a diferentes tipos de sensores entre eles de CO₂. Os métodos usados foram Support Vector Machine (SVM), Redes Neurais Artificiais (RNAs) e ainda o Hidden Markov Model (HMM). O HMM foi aquele que demonstrou melhores prestações devido à sua capacidade de ignorar breves alterações de ocupação assim como de se manter estável durante largos períodos de ocupação continua, com previsões com cerca de 65% de precisão. O som e o CO₂ foram aqueles que apresentaram melhores prestações segundo [20], em parte devido aos valores relativamente constantes ao longo do tempo.

No seguimento de [20], foram feitas novas implementações de sistemas de inferência tendo por base o CO₂ e o som como variáveis de entrada em [21], com o objetivo de efetuar o controlo do sistema de aquecimento de uma residência. A metodologia utilizada recaiu numa abordagem heurística em que as condições para ocupação de uma divisão recaíam, no caso do som, em existirem medições superiores ao limite 37,5 dB e no caso do CO₂ uma subida de 50 ppm entre duas medições consecutivas para passar ao estado de ocupado e uma descida de 50 a 100 ppm para o abandono da divisão.

Os fatores com influência e que podem ser importantes a ter em conta foram nomeados em [22] aquando da elaboração da relação entre os níveis de CO₂ e os ocupantes presentes nas várias divisões em estudo. O estado das portas vem influenciar as velocidades de subida dos níveis de CO₂, circulações de ar são especialmente influenciadoras dos valores de CO₂ quer a nível interno como através de trocas com o exterior, devido às diferentes concentrações de dióxidos de carbono. A capacidade de conhecer o número de pessoas é também classificada como limitada, não sendo estranho casos em que uma só pessoa possui valores de emissão superiores a duas outras, quer por razões de atividade física, quer por razões fisiológicas.

Capítulo 3

Implementação

No presente capítulo será abordado todo o processo de elaboração do sistema de inferência do nível de ocupação da habitação. Será feita uma primeira exposição dos objetivos e características deste e posteriormente descrita a abordagem seguida para proceder à sua implementação.

3.1 Especificação do Sistema

O sistema tem como objetivo a criação de uma previsão da ocupação do edifício através dos dados obtidos pelos diversos módulos que se encontram nas diferentes divisões, tendo como principais características:

- Mapa semanal, ou seja, possibilidade de poder consultar os dados a uma hora ou dia específico da semana, sendo a previsão melhorada com o passar das várias semanas.
- Medição de um total de 3 divisões, uma delas no mesmo local do computador central e duas em locais remotos, através de comunicação sem fios.
- Módulos com funcionamento sem fios numa rede com configuração em malha, com sensores de medição dos níveis de CO₂ ambiente.
- Computador central com a função de fazer os pedidos aos vários módulos dos valores de CO₂ num determinado momento, neste caso com intervalos de 60 segundos entre cada uma das medições.
- O sistema sem fios com base no protocolo ZigBee sendo toda a comunicação feita através de módulos XBee no modo API (Aplicattion Programming interface).

- Sensores utilizados para medição de CO₂ MQ-135, com capacidade de medição entre 10 e 2000 ppm de CO₂ com uma precisão de aproximadamente 50 ppm.

3.2 Material utilizado

A escolha dos materiais para execução desta tese teve como principal foco a criação de um sistema que cumprisse as funções pretendidas de forma eficiente e fazendo uso de materiais de relativamente fácil acesso.

Lista de material base utilizado na elaboração do sistema:

- Arduino Uno rev:3
- Wireless Shield
- Módulos XBee S2
- Sensores MQ-135
- Condensadores, resistências e reguladores de tensão de 5V para 3,3V
- Computador com sistema operativo Windows
- Breadboards
- Material de ligação

Optou-se por utilizar os módulos de comunicação XBee pela sua simplicidade na criação de redes robustas, pela existência de bibliotecas de comunicação com alguma maturidade e com suporte por parte do fabricante, permitindo assim precaver erros de comunicação para que todo o processo de implementação possa decorrer da forma mais fluída possível devido à grande complexidade que pode advir da existência de erros na camada de comunicação e que muitas vezes se tornam de difícil análise.

A escolha do Arduino deveu-se principalmente ao facto de ser uma plataforma relativamente barata e já com bastantes provas dadas, tendo por isso bastante suporte

quer ao nível do software, quer ao nível do hardware com a existência de uma grande quantidade de hardware, mais especificamente Shields, que permitem fazer a ponte com as mais variadas interfaces.

A escolha dos sensores recai sobre um dos dois principais tipos existentes. Por um lado os detetores através de infravermelhos, que são dispositivos com grande precisão associada mas no entanto o seu custo é bastante alto quando comparado com sensores baseados no funcionamento químico. Optou-se então por um sensor com funcionamento baseado no processo químico, o sensor escolhido foi o MQ-135 pois o seu custo é bastante baixo, entre 5 a 10 euros, e permite medir CO₂ entre 10 e 2000 ppm de forma precisa, cobrindo assim o intervalo de valores necessário, sendo que o valor nível atual de CO₂ ao ar livre é de aproximadamente 402 PPM, valor este medido pelo observatório Mauna Loa. [23]

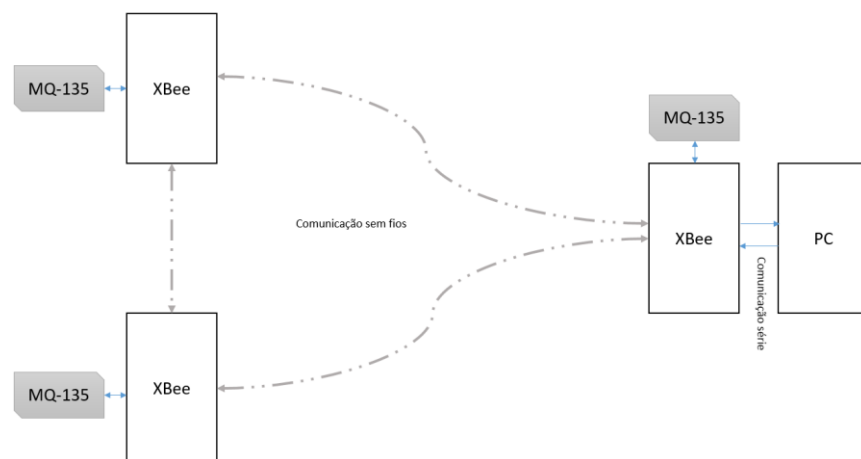


Figura 3.1 Esquema base do sistema de análise de ocupação com base no CO₂

O uso do computador como central de todo o sistema prendeu-se com a maior versatilidade no que diz respeito ao armazenamento da informação bem como da apresentação da mesma ao utilizador, permitindo assim uma abordagem mais visual no que diz respeito à apresentação das várias informações e com uma maior capacidade de processamento quando comparado com o Arduino ou outra plataforma de prototipagem semelhante, sendo observável na Figura 3.1 a localização do computador na topologia do sistema.

3.3 Desenvolvimento dos módulos

3.3.1 Módulos Remotos

Os sistemas remotos são compostos por um módulo para comunicação sem fios, XBee S2, bem como um sensor MQ-135 que é responsável pela medição dos valores de CO₂ ambiente.

O sensor MQ-135 tem como base de funcionamento uma resistência de aquecimento para criar as condições necessárias ao funcionamento do sensor e o sensor propriamente dito que nos vai fornecer as medições através da variação da sua resistência interna. Este sensor precisa de ser alimentado a uma tensão de 5V DC o que leva a que seja ideal que a alimentação principal dos módulos seja feita a esta tensão. No entanto os módulos de rádio XBee funcionam a 3,3 V o que faz com que tenha de ser criada uma linha de alimentação diferente para estes.

A primeira fase da implementação do módulo é então a criação do sistema de alimentação que permita alimentar simultaneamente o módulo XBee bem como o sensor CO₂ MQ-135.

Com o regulador LM3940 foi então feita uma linha de 3,3V para alimentar o XBee, com a configuração da Figura 3.2, sendo o sensor alimentado diretamente pelos 5V provenientes da fonte de alimentação de forma a cumprir os requisitos de aquecimento necessários para o seu correto funcionamento.

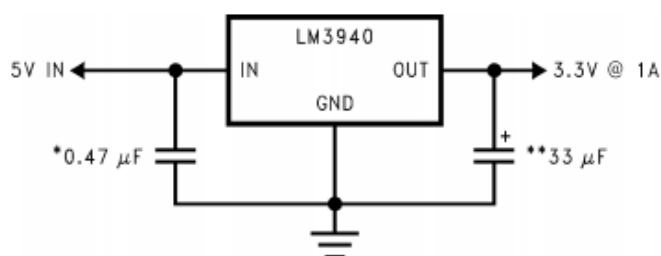


Figura 3.2 Esquema de montagem do regulador LM3940

O segundo fator prende-se com a entrada do conversor analógico digital do XBee que no máximo suporta 3,3V na sua entrada. Embora a tensão prevista na resistência de carga seja muito abaixo do máximo permitido nas entradas do XBee, por razões de segurança e sendo que os 3,3V são dois terços dos 5V aplicados ao sensor, um simples divisor de tensão com esta proporção permite garantir que o valor da tensão obtido na resistência de carga que vai ser usada para medir a tensão a saída do sensor nunca seja superior aos 3,3V, evitando assim danificar o XBee e comprometer o bom funcionamento do módulo. A tensão de referência interna do XBee para os seus ADCs é de 1,25V com uma resolução de 10 bits o que nos dá 1024 intervalos de 0V a 1,2V sendo mais do que suficientes para capturar as mais pequenas variações. Na Figura 3.3 é visível a configuração de um dos módulos remotos.

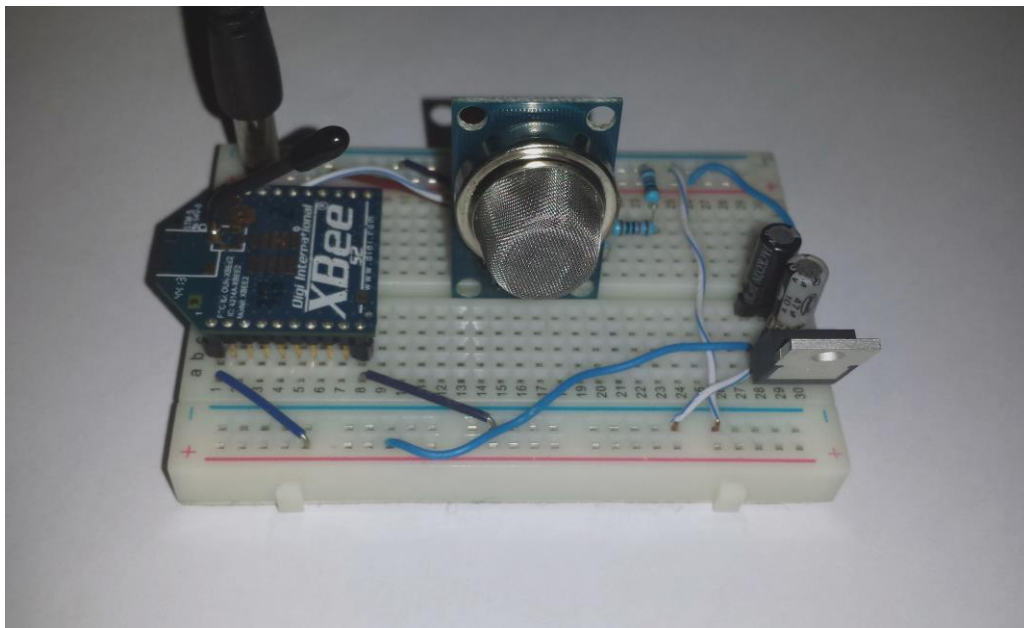


Figura 3.3 Módulo remoto

3.3.2 Módulo local

O módulo local, visível na Figura 3.4, é implementado através do uso de um Arduino acoplado com um *Wireless Shield* em que o módulo XBee é diretamente inserido.

O *Wireless shield* já tem toda a parte do acondicionamento da alimentação do XBee não sendo necessário fazer nenhum circuito auxiliar. Apenas é necessário fazer o divisor de tensão para garantir que nunca sejam ultrapassados os 3,3V na entrada do ADC e o

módulo está pronto a ser ligado ao computador pela porta USB do Arduino de forma a fazer a comunicação direta entre o PC e XBee por meio de comunicação série através do conversor interno UART-USB do Arduino. Toda a comunicação é feita por série não entrando o Arduino ativamente em nenhuma parte do processo sendo neste caso apenas um meio de comunicação entre o XBee e o computador.

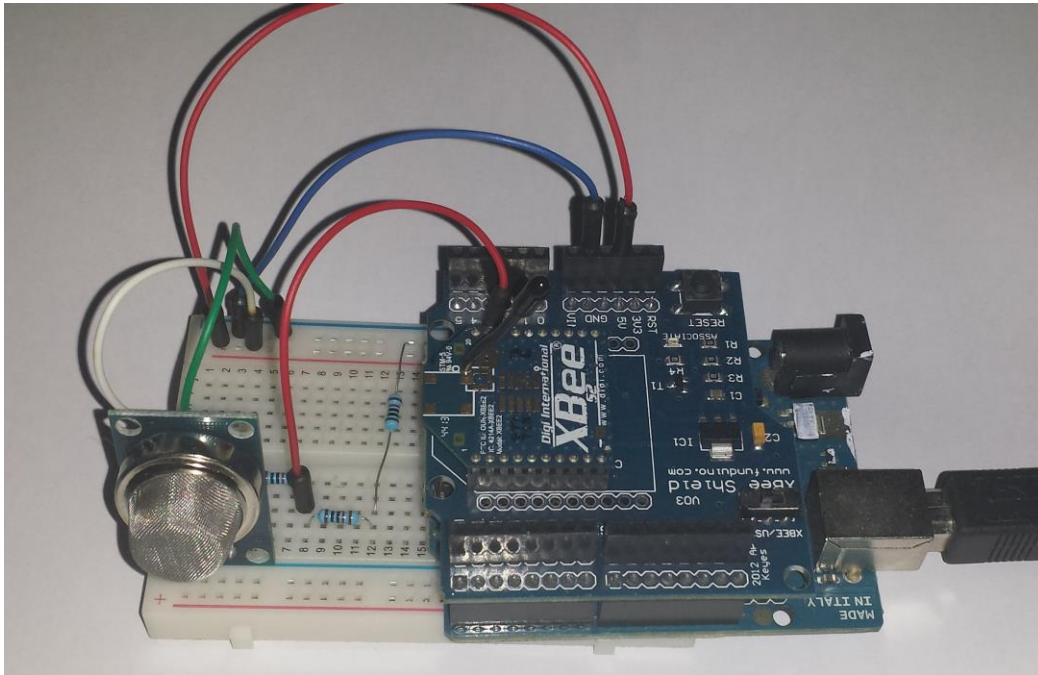


Figura 3.4 Sistema local com XBee

3.4 Calibração dos sensores

Embora os vários sensores MQ-135 tenham o mesmo processo de fabrico devido ao processo químico que está na base do seu funcionamento os seus valores de resistência são tendencialmente diferentes, o que leva a que haja necessidade de fazer a sua calibração para que seja possível obter valor coerentes entres os vários pontos de medição. Na Figura 3.5 é possível observar a variação da concentração de CO₂ com base na razão $\frac{R_s}{R_o}$. Este gráfico representa a curva de calibração padrão para uma

temperatura ambiente de 20 graus celsius, uma humidade relativa do ar de 65% e uma concentração de oxigénio de 21%, sendo que:

- R_0 representa a resistência do sensor numa situação em que existe no ar 100 ppm de NH_3 .
- R_s representa a resistência do sensor na presença de várias concentrações de diferentes gases.

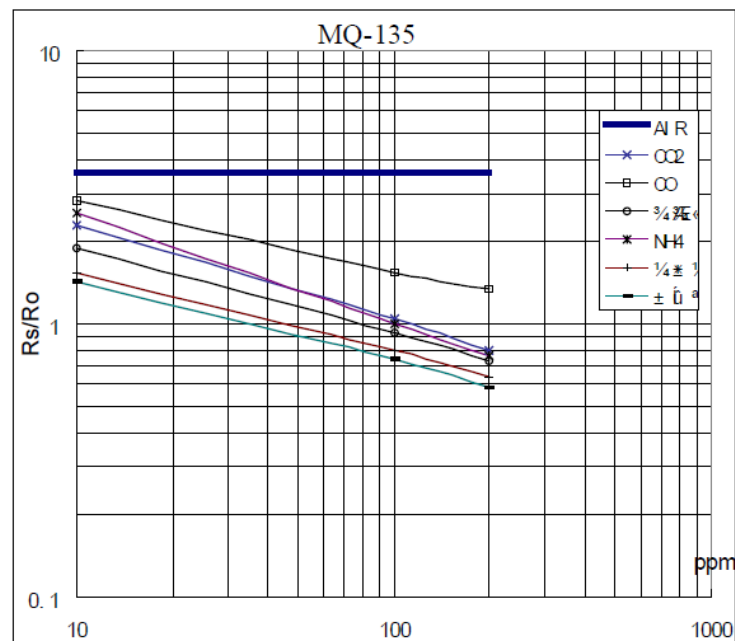


Figura 3.5 Curva característica do sensor MQ-135

Sendo a Figura 3.5 uma representação logarítmica da curva de característica do sensor e para melhor poder fazer os cálculos necessários à calibração dos sensores procedeu-se a passagem do gráfico para uma escala decimal e apenas referente ao dióxido de carbono, Figura 3.6.

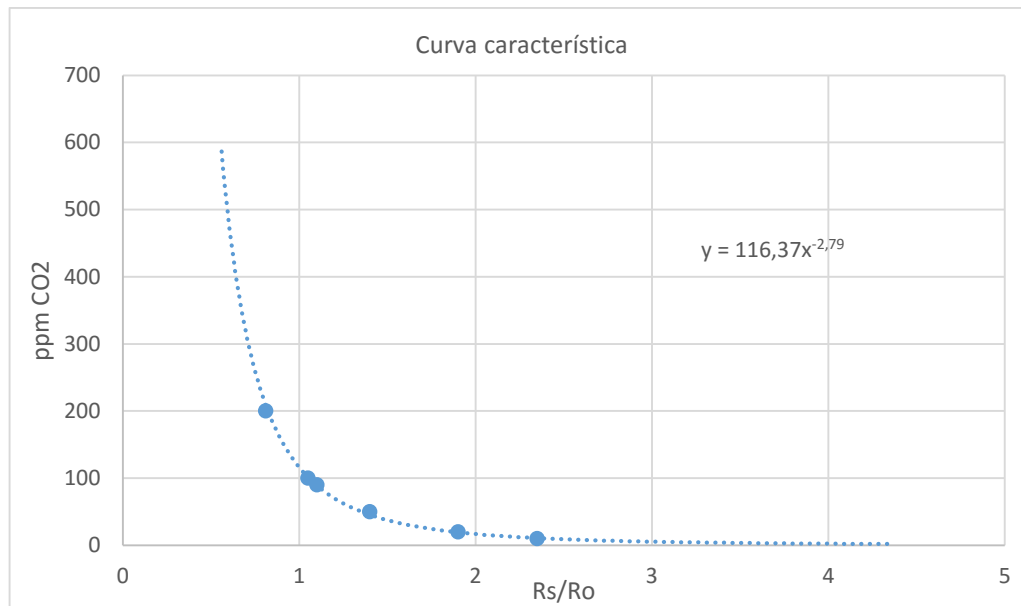


Figura 3.6 Curva característica do sensor MQ-135 referente ao CO₂

Com os pontos extraídos do gráfico por extrapolação foi então feita uma aproximação numérica apenas da curva referente ao CO₂ por ser este o composto com interesse para este trabalho, não sendo os restantes relevantes. O conjunto de pontos foi aproximado por uma função exponencial com o intuito de poder saber qual o valor do Ro de cada um dos sensores através do uso de uma medição em condições conhecidas.

A função exponencial obtida que aproxima então o conjunto de pontos foi:

$$y = 116,37x^{-2,79} \quad (3.1)$$

A curva obtida apresenta um coeficiente de correlação $R^2=0,9972$, sendo portanto uma aproximação fiável dos dados obtidos através da ficha técnica do sensor.

De uma forma mais simplista temos que, a variável y corresponde ao valor em ppm do gás em questão, neste caso o CO₂, e a variável x trata-se da razão $\frac{R_s}{R_o}$, que contém o valor de Ro nos é desconhecido para cada um dos sensores. Será então preciso obter o

valor R_s para que se possa calcular o valor de CO_2 no ambiente gasoso em que o sensor se encontra.

Para obter o valor de R_o fazemos então uso da equação (3.1) na seguinte forma:

$$R_o = \frac{R_s}{\left(\frac{y}{a}\right)^{\frac{1}{b}}} \quad (3.2)$$

Em que os valores das constantes “ a ” e “ b ” são os seguintes:

$$a=116,37 \text{ e } b=-2,79$$

Para encontrar o valor de R_o para que possa ser feita a calibração dos vários sensores é no entanto necessário ter dados de um conjunto de valores conhecidos. Neste caso saber o valor da resistência R_s do sensor bem como o valor correspondente em ppm de CO_2 , no entanto devido a limitações logísticas não foi possível obter um equipamento que pudesse fornecer o valor em ppm de CO_2 pelo que se optou por utilizar uma técnica um pouco menos robusta mas que acabou por devolver resultados aceitáveis.

Este método envolve o uso do valor de CO_2 na atmosfera terrestre, que se trata de um valor relativamente constante desde que não seja medido num grande centro urbano devido às perturbações da poluição geradas por fábricas, automóveis entre outros.

Os sensores foram então deixados numa zona ao ar livre durante um período de 24 horas que é o valor de pré-aquecimento dos sensores aconselhado na sua ficha técnica. Foram efetuadas várias medições após este período usando um multímetro e calculado o valor médio obtido para condições de 402 ppm de CO_2 , valor de CO_2 atmosférico obtido através dos dados publicados pelo observatório de Mauna Loa [23].

Tabela 3.1 Conjunto de dados obtidos ao ar livre

	Local	Remote	Remote1
Tensão (V)	0,1978	0,1373	0,1300
Resistência de R_s (k Ω)	23,5069	34,2758	36,2614

Com os valores da Tabela 3.1 é então possível calcular os valores do R_o para os vários sensores e assim saber o número de partes por milhão de CO₂ no ar com cálculo do valor da resistência do sensor.

Tabela 3.2 Valor de R_o para os vários sensores MQ-135

	Local	Remote	Remote1
Resistência de R_o (k Ω)	36,95017	53,83002	56,79864

Os valores de R_s obtidos vão de acordo com o que seria esperado, sendo coerentes com aqueles apresentados na ficha técnica. Os valores de R_o (Tabela 3.2) embora não sejam iguais entre si, são semelhantes. Dentro de um grupo de diversos sensores analisados foram observados valores ao longo do intervalo de 10 a 150 quilo-ohm. Quando analisada esta diferença relativamente ao intervalo referido, podemos observar que os valores da resistência são próximos. Estas diferenças devem-se possivelmente à natureza dos métodos e materiais que são usados no fabrico dos sensores e não apresentam problemas para o bom funcionamento dos sensores estando dentro dos intervalos esperados.

É agora possível através da expressão abaixo obter os valores em ppm de CO₂ no ar tendo apenas conhecimento da sua resistência através da seguinte expressão:

$$y = 116,37 \left(\frac{R_s}{R_o} \right)^{-2,79} \quad (3.3)$$

No que diz respeito à abordagem escolhida, a mais correta passaria pela criação de uma reta de calibração para cada um dos sensores através do uso de um equipamento já calibrado e com condições laboratoriais adequadas de forma a garantir a presença apenas de CO₂ no meio de teste. No entanto tal não foi possível, e embora não seja um método com grande exatidão associada, a abordagem usada permite obter valores suficientemente exatos para o efeito pretendido, no entanto caso se estivesse a lidar com um sistema mais sensível com possibilidade de perigo para o ser humano tal abordagem seria completamente desaconselhável pelo grande risco que poderia advir com a falta de precisão que poderia estar associada a estes valores.

Os valores obtidos após a calibração dos sensores vão ao encontro do que seria esperado para os níveis de CO₂ presentes numa habitação com condições ditas normais, com valores a rondar as 400 a 475 ppm de CO₂ durante períodos longos de ausência de pessoas na casa.

3.5 Comunicação através de rede ZigBee Mesh

O ZigBee é um protocolo de alto nível para criação de redes sem fio de área pessoal, tendo como base o protocolo IEEE 802.15.4. Dispositivos em que o seu funcionamento tem por base este protocolo podem transmitir dados a grandes distâncias através da capacidade de utilizar dispositivos intermédios como meio de chegar ao ponto de destino fazendo uso de redes com configuração em malha para atingir este fim. [24] O ZigBee tem um ritmo de transmissão definido de 250kb/s [25], sendo especialmente adequado a sensores ou dispositivos de controlo como por exemplo interruptores. As camadas implementadas pelo ZigBee sobre o protocolo IEEE 802.15.4 introduzem três funções de especial relevância:

- Encaminhamento - Tabelas de encaminhamento que definem como é que cada um dos módulos pode fazer chegar a mensagem ao destino por intermedio de outros.
- Criação de redes Ad hoc – Permite a criação de uma rede completa de módulos rádio de forma autónoma sem a intervenção humana
- Reparação de malha – Métodos de reparação da tabela de encaminhamento em caso de falha de um dos módulos para que possam ser restabelecidos novos caminhos para transmissão de informação.

Todas as redes ZigBee têm sempre um módulo coordenador responsável pela criação da rede, distribuição de endereços bem como todos os aspetos de manutenção desta, como é o caso da segurança. Para que possa ser uma rede é necessário existirem ainda módulos router ou end-point, sendo os routers nós da rede com capacidade completa de receber e enviar informação assim como de encaminhá-la. Por seu lado os módulos end-point podem ser vistos como routers com funções diminuídas tratando apenas de receber e enviar informação com o seu router ou coordenador. [25, 26]

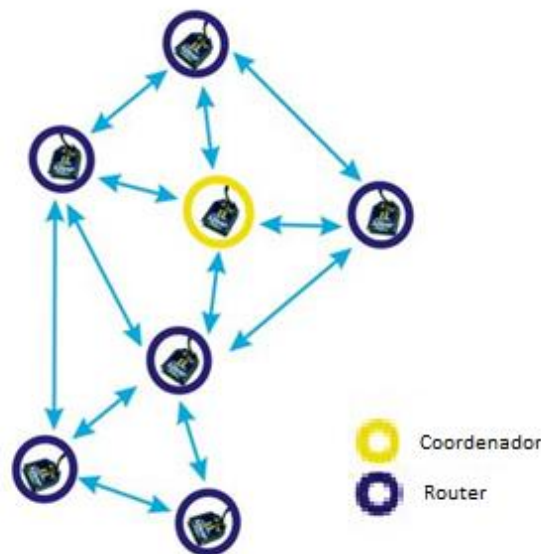


Figura 3.7 Exemplo da topologia de uma rede ZigBee Mesh

A topologia implementada na presente dissertação faz uso de dois módulos configurados como routers e de um módulo coordenador, tratando-se assim de uma pequena rede em malha, com comunicação bilateral entre todos os integrantes desta.

Os módulos XBee S2 utilizados para fazer a implementação da rede ZigBee possuem dois tipos de modo que podem ser utilizados, Application Transparent (AT) em que toda a informação recebida na sua entrada série é posta na fila para ser transmitida, sendo o inverso também verdadeiro e temos ainda um modo API (Interface de programação de aplicações) em que a comunicação com o módulo é feita através de uma estrutura predefinida, as Frames API. Este método especifica como os comandos, respostas e mensagens de estado são enviadas e recebidas pela interface série do módulo XBee [27], permitindo um vasto leque de operações como por exemplo:

- Configurar o módulo Xbee
- Configurar módulos da rede de forma remota
- Gestão de dados e transmissão para múltiplos destinos
- Receber informação de falhas nas transmissões de pacotes.
- Identificar a fonte de cada um dos pacotes recebidos

A Tabela 3.3 contém um exemplo da estrutura de uma frame com o intuito de obter o valor atual presente na entrada do ADC de um XBee localizado remotamente, método este utilizado para obter os valores de CO₂ nos módulos remotos.

Tabela 3.3 Exemplo de frame usada para leitura remota

Campo	Exemplo (HEX)	Descrição
Delimitador inicial	7E	Todas as frames API têm o delimitador 0x7E
Comprimento	0010	Comprimento da frame
Tipo de frames	17	0x17 é o tipo referente a um comando AT remoto
Endereço de destino 64-bit	0013A20012345678	Endereço do módulo que irá recolher a amostra
Endereço de destino 16 bit	FFFE	Este campo deve ser deixado 0xFFFF para que apenas seja usado o endereço de 64 bits
Opções do comando AT	00	Opções avançadas mas sem uso para a recolha de amostras remotas
Comando AT	4953	O comando AT é definido aqui, neste caso 0x49 0x53
Checksum	85	O checksum é calculado através da subtração a 0xFF da soma de 8 bits dos bytes entre o comprimento e o checksum.

3.6 Fluxograma do arranque da rede de recolha

Abaixo, Figura 3.8, é possível observar a sequência usada pelo programa para iniciar o serviço de recolha de dados dos vários módulos.

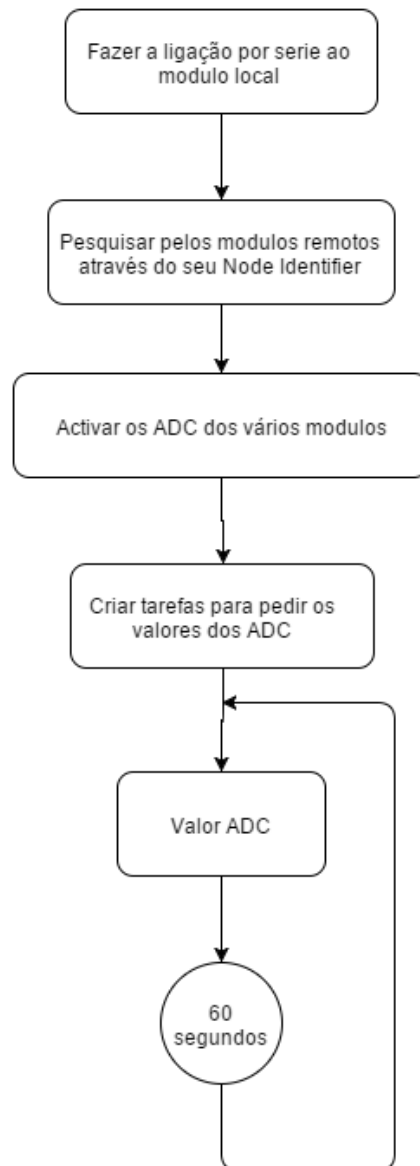


Figura 3.8 Fluxograma do processo de recolha de dados

A recolha remota é feita através do uso de duas tarefas que fazem o pedido do valor da tensão na entrada do ADC dos vários XBee num intervalo predefinido de 60 segundos, após o pedido o valor é recebido e tratado. O valor de 60 segundos para o ciclo de recolha poderia ser considerado relativamente longo, no entanto devido à natureza do

processo que será analisado, esta velocidade de amostragem revela ser mais do que suficiente pois a inserção de CO₂ no ar é feita de forma bastante lenta, facilitando assim toda a parte de tratamento e processamento de dados

3.7 Estrutura de dados

A estrutura de dados consiste numa divisão da semana em dias para cada um dos três módulos concebidos, um local e dois remotos (Figura 3.9). Cada um destes conjuntos de informação está associado ao seu módulo que por seu lado representa a divisão em que este se insere.

Local	Remoto	Remoto1
Domingo	Domingo	Domingo
Segunda	Segunda	Segunda
Terça	Terça	Terça
Quarta	Quarta	Quarta
Quinta	Quinta	Quinta
Sexta	Sexta	Sexta
Sábado	Sábado	Sábado

Figura 3.9 Estrutura de dados semanal

Cada um destes dias da semana vai então ser dividido nas várias horas do dia para que possa ser caracterizada a probabilidade de existência de pessoas nesses intervalos de tempo, bem como armazenada a informação das várias amostras (Figura 3.10).

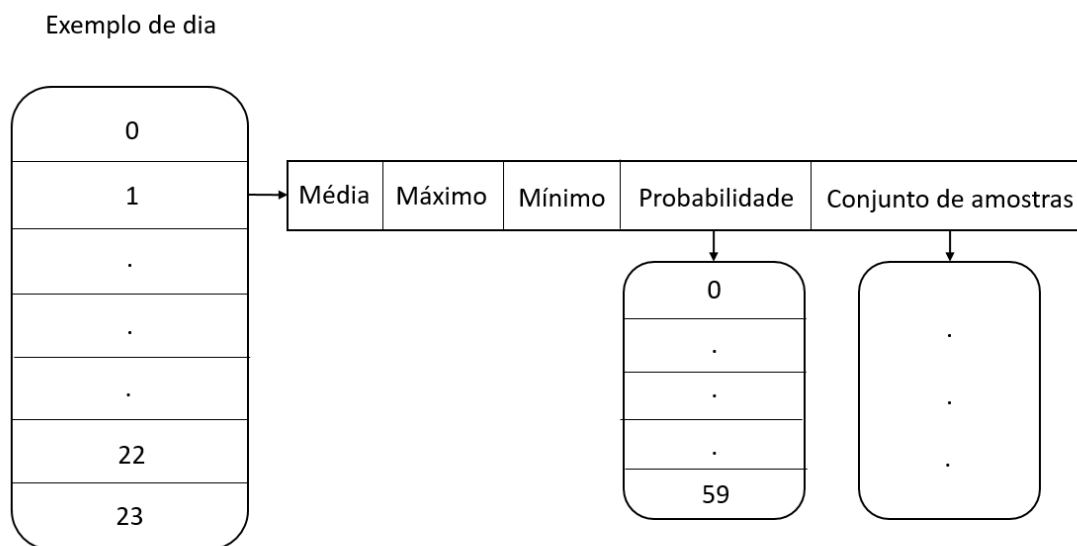


Figura 3.10 Estrutura visual dos dados ao longo do dia

Cada hora tem associado um valor médio do nível de CO₂, bem como um valor máximo e mínimo. Estes valores são atualizados sempre que é feita uma nova leitura para que sempre que sejam necessários estejam disponíveis e atualizados.

O campo probabilidade é calculado sempre que pedido pelo utilizador, pois por se tratar de uma tarefa com uma quantidade de cálculos considerável seria feita uma sobrecarga entre leituras sem que fosse estritamente necessário.

Os conjuntos de amostras são caracterizados por um campo com o valor em ppm bem como a data em que a amostra foi efetuada.

Existe ainda um conjunto de dados correspondentes à probabilidade associada a cada um dos 60 minutos que perfazem uma hora do dia.

3.8 Deteção de presença ou contagem de pessoas

Numa fase inicial foram estudadas formas para tentar inferir a quantidade de pessoas que se encontram em determinada divisão no entanto, embora tenham sido consideradas várias técnicas, não foi possível obter valor coerentes, quer pelo facto do nível de dióxido de carbono que cada pessoa liberta ser diferente entre si e depender do seu estado de atividade física, quer por haver circulação de ar entre divisões ou até mesmo devido ao ar atingir níveis de “saturação”. Todos estes factos são limitantes aquando da quantificação do número de pessoas que se encontram na divisão.

Optou-se então por abordar a presença ou não de pessoas em oposição à contagem destas, pois permite obter resultados válidos que podem ser utilizados de forma fidedigna e sem erros de maior, ao contrário do que seria uma extrapolação grosseira e com grande imprevisibilidade associada à tentativa de quantificar o número de pessoas.

3.9 Inferência de ocupação

Como premissa inicial é assumido que todas as divisões se encontram desocupadas sendo portanto a sua probabilidade de ocupação 0%, sendo que por cada amostra do nível de CO₂ efetuada esta percentagem vai sofrer uma alteração tendo em conta o algoritmo implementado e descrito em seguida.

Ao ar livre os níveis de concentração de CO₂ no ar são de aproximadamente 400 ppm [23], portanto após os ensaios experimentais com vista a obter um valor de *threshold* inicial para a existência de pessoas numa divisão chegou-se à conclusão que quando o valor numa divisão está aproximadamente 75% mais alto que no exterior estamos perante a presença de ocupantes.

Portanto como primeira fase é testada esta condição e a partir daí obtido um primeiro valor que indica que há ocupação da divisão e portanto:

Valor da amostra > 700 ppm de CO₂

Pode considerar-se como premissa inicial uma probabilidade de existência de pessoas naquele exato momento de 100%.

A probabilidade de existirem pessoas num determinada minuto vai então ser dada por:

$$P_{minuto}(n) = \frac{P_{minuto}(n-1) \times N_{amostras} + P_{nova amostra}}{N_{amostras} + 1} \quad (3.4)$$

Sendo P_{minuto} a probabilidade de existirem pessoas na divisão naquele respectivo minuto. No entanto apenas tendo em conta o limite definido anteriormente para a existência de pessoas numa determinada divisão não é possível obter um valor correto para a probabilidade destas se encontrarem efetivamente no local. Este problema advém das propriedades físicas dos gases, que leva a que o CO₂ tenda a distribuir-se uniformemente pelas várias divisões, e também devido às características do edifício em causa, quer pela existência de pontos de extração de ar, como janelas, portas entre outros.

Quando se está perante um cenário em que as trocas gasosas com o exterior não são efetuadas facilmente existe um problema de acumulação do CO₂ sem que este seja extraído de forma eficiente levando a que seja necessária uma grande quantidade de tempo para que os valores se equilibrem com os do exterior, levando a grandes períodos com níveis elevados de CO₂, o que vem dificultar a análise da ocupação apenas através do limite definido anteriormente.

Para que se possa continuar a obter valores fiáveis é preciso então ter em conta outras informações obtidas nas leituras, tornando assim possível obter ocupações dos espaços mais fidedignas, neste caso as características tidas em conta são o quanto as amostras se mantêm constantes e sem variações bruscas e ainda qual a sua tendência no tempo, se de descida ou subida.

O método utilizado para conseguir ter acesso a esta informação foi a regressão linear simples, sendo esta aplicada aos dados para desta forma ser obtida informação sobre a tendência dos níveis de CO₂ e qual a sua variação no tempo.

A existência de uma reta com inclinação positiva revela um aumento da concentração de CO₂ no ar, o que se trata de um indicador bastante forte da presença de pessoas, no entanto uma tendência decrescente não é por si só indicador de ausência, esta é normalmente acompanhada de uma variação relativamente baixa. Isto deve-se ao facto de que quando presentes na divisão, os indivíduos causam perturbações nas medições, quer devido à sua respiração, bem como ao criarem fluxos de ar através do seu movimento que vão alterar as medições. Este fenómeno é perceptível na Figura 3.11 que mesmo tendo uma tendência decrescente a sua variação é indicadora que ainda existe a possibilidade de se encontrarem pessoas na divisão. Este caso pode advir do facto de ter sido criada uma entrada de ar exterior por meio de uma janela diminuindo a concentração de CO₂, no entanto esta é apenas uma das possíveis causas.

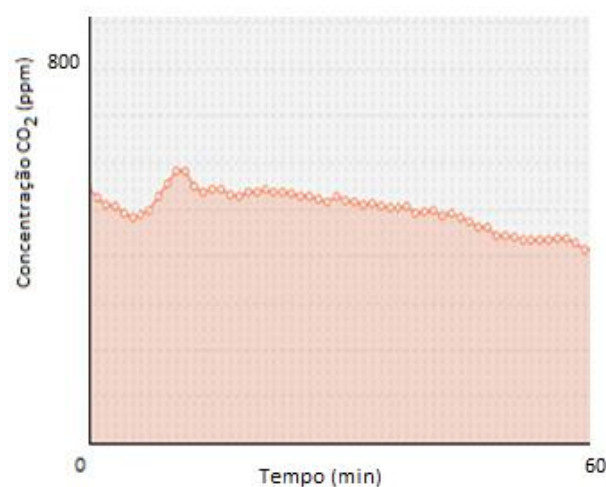


Figura 3.11 Exemplo de tendência decrescente com variação

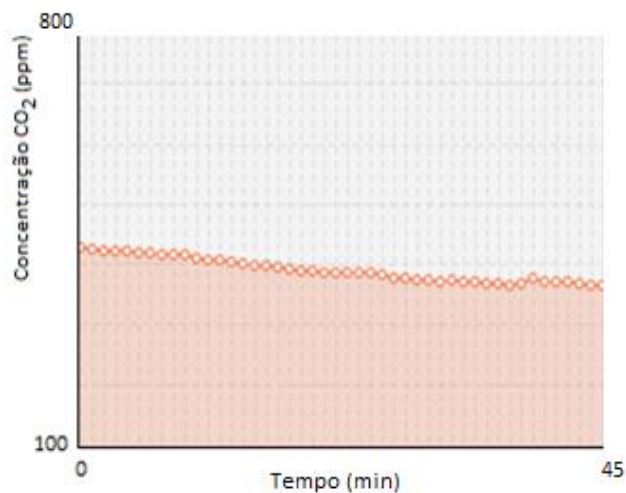


Figura 3.12 Exemplo tendência decrescente constante

Como é possível observar na Figura 3.11 e Figura 3.12, embora exista uma tendência decrescente no valor dos níveis de CO_2 é possível inferir a potencial presença de pessoas pelas perturbações registadas, sendo que a não existência destas perturbações é mais um factor indicador de possível ausência de presença.

No entanto os valores máximos para que estas variações sejam contadas não tem forma de ser definido de forma exata. Este parâmetro terá de ser analisado tendo em conta as características da divisão em que se encontra o sensor e afinado de acordo com os dados obtidos. Uma divisão de grandes dimensões em que inserção de perturbações não tem um impacto tao grande do que aquele que seria observável num quarto pequeno, quer devido ao grande volume de ar, quer pelas condições de circulação de ar. É ainda necessário considerar o efeito do ruído que é inserido pelos sensores nas medições e que pode gerar comportamentos semelhantes aos já referidos anteriormente.

A análise das várias características é feita utilizando uma abordagem de janelas temporais, neste caso com uma hora de duração, para que possam ser feitas múltiplas regressões lineares simples aos dados obtidos de forma ter conhecimento de quais as características destes, quer a nível da tendência de subida ou descida bem como a

variância destes. Na Tabela 3.4 é feito um quadro resumo que contém os diversos cenários a ter em conta para que seja possível inferir a presença de pessoas na divisão.

Tabela 3.4 Lista de características dos valores de CO₂

Característica do sinal	Indicador
Valor <700 ppm de CO ₂	Ausência
Sinal crescente	Presença
Sinal decrescente	Ausência ou diminuição do número de pessoas
Sinal irregular	Possível presença de pessoas

Este conjunto de características será a base a ter em conta para que possa ser inferida a presença de pessoas num determinado local através das quantidades de CO₂ no ar. É no entanto de referir que a partir do momento em que o valor se encontra acima do patamar de 700 ppm já não existe interesse pelo valor quantitativo mas apenas por qual a sua tendência.

3.10 Fatores com influência nas medições

Alguns dos fatores conhecidos com influência nas medições são:

- Trocas gasosas com o exterior quer por meios naturais, quer por sistemas de climatização e condicionamento de ar.
- Presença de compostos como o monóxido de carbono (CO), o Amónio (NH₃) ou compostos com o grupo Álcool.
- Combustões
- Temperatura do meio ambiente.

O maior desafio apresentado por estes fatores vem das trocas gasosas com o exterior mais especificamente janelas abertas nas divisões. Este fator tentará ser contornado sendo tido em conta no algoritmo de deteção de pessoas, através da análise da irregularidade das medições, no entanto nem sempre será possível contornar este problema devido à grande variabilidade que este tipo de ocorrências tem associada.

No que diz respeito aos gases com influência na leitura do sensor, não é espectável que estes se encontrem em quantidades apreciáveis num edifício com presença humana não sendo portanto feita nenhuma tentativa de minimizar estes fatores, pelo menos num horizonte próximo.

As combustões são um problema com alguma importância em especial devido aos fogões e esquentadores a gás que são usados numa grande maioria das casas, sendo o fumo do tabaco também uma fonte de perturbação por se tratar de uma combustão e por consequente emitir dióxido de carbono para o ar. O ambiente em que foram efetuados os testes não tem influência destes fatores, no entanto é bastante importante que estes sejam tidos em conta noutras situações.

A temperatura do ambiente num espaço fechado com o de uma habitação não sofre variações de amplitude suficiente para ter influência nas leituras, no entanto é algo que pode ser tido em conta para melhorar a precisão das medições.

3.11 Interface do sistema

O sistema apresenta uma interface relativamente simples tendo como principal foco a apresentação dos vários dados ao utilizador. Esta foi desenvolvida na linguagem de programação Java, assim como todo resto do programa que trata da parte de recolha e tratamento de dados. Foi utilizada a ferramenta WindowBuilder para criação da interface gráfica por permitir uma abordagem multiuso apenas com recurso a bibliotecas nativas do Java [28]. A apresentação dos dados é feita através do uso do JavaFX, que se trata de uma plataforma nativa para apresentação de grandes

quantidades de informação sob forma gráfica de forma leve e com grande grau de controlo [29], diminuído assim o número de bibliotecas externas necessárias para executar o programa. Aquando da execução do programa toda a parte visual assenta apenas em bibliotecas nativas de Java sendo apenas necessário fazer uso de bibliotecas externas para cálculos matemáticos e para interação com a porta série. Na Figura 3.13 é observável o controlo da apresentação de dados no canto superior esquerdo, o arranque do serviço de recolha de dados no canto superior direito e a parte de apresentação dos dados ao centro, criada através do JavaFX.

É possível visualizar os dados em três espaços temporais distintos, ou seja, existe a possibilidade de visualizar a semana inteira, dias ou horas específicos em termos de valores médios, máximos, mínimos de concertação de CO₂ assim como a probabilidade de ocupação. Podem ainda ser visualizados os valores obtidos de CO₂ em cada hora, sendo criada uma representação visual gráfica destes dados para uma mais rápida visualização. Existe a possibilidade de visualizar as informações de cada uma das divisões em separado ou então de todas em conjunto através de um gráfico semitransparente com as informações de todas as divisões em simultâneo para uma melhor comparabilidade.

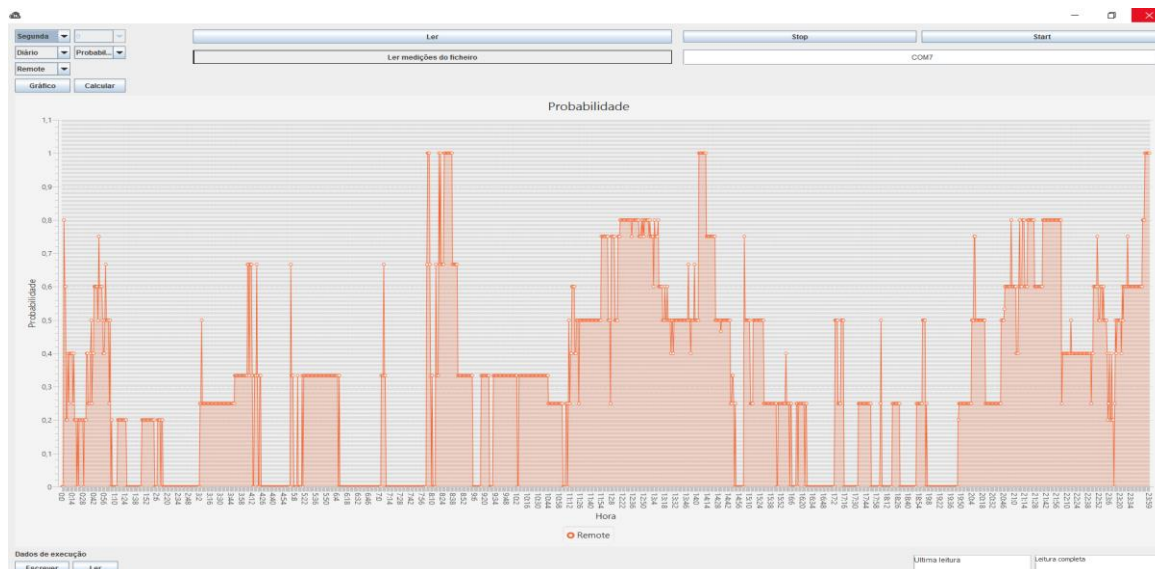


Figura 3.13 Interface do programa

O programa contém ainda uma zona de controlo dos processos de leitura dos dados do sensor local bem como dos dois localizados remotamente e que têm comunicação através dos módulos XBee. Nesta zona de controlo é possível iniciar e parar este processo bem como definir qual a porta de comunicação utilizada entre o computador e o módulo local. É ainda possível carregar os dados dos sensores através de um ficheiro que é gerado e constantemente atualizado ao longo do processo de recolha de dados.

Capítulo 4

Análise de resultados

No presente capítulo serão expostos os resultados obtidos através da implementação descrita no capítulo 3.

4.1 Entrada e saída de pessoas na divisão

Na Figura 4.1 é possível ver o comportamento do perfil de CO₂ numa situação de entrada de uma pessoa no interior da divisão com o fecho da porta em seguida de forma a diminuir os fluxos de ar com o resto da casa. Na Figura 4.2 é observável que existe um atraso entre o momento de entrada real da pessoa na divisão e o reconhecimento de esta se encontra no interior, o valor deste atraso não é possível ser definido para todas as situações pois não se trata de um valor constante, no entanto neste caso em específico está-se perante uma diferença de cerca de 25 minutos entre o tempo em que foi detetada a ocupação da divisão e o estado real desta.

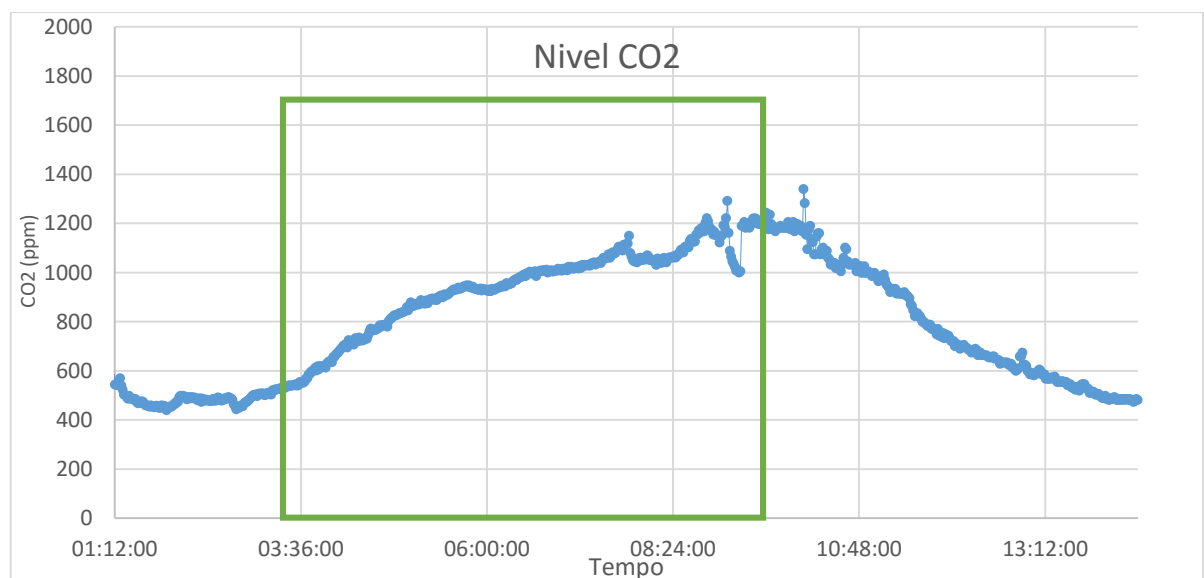


Figura 4.1 Níveis de CO₂ durante o período de ocupação da divisão, retângulo a verde período de ocupação

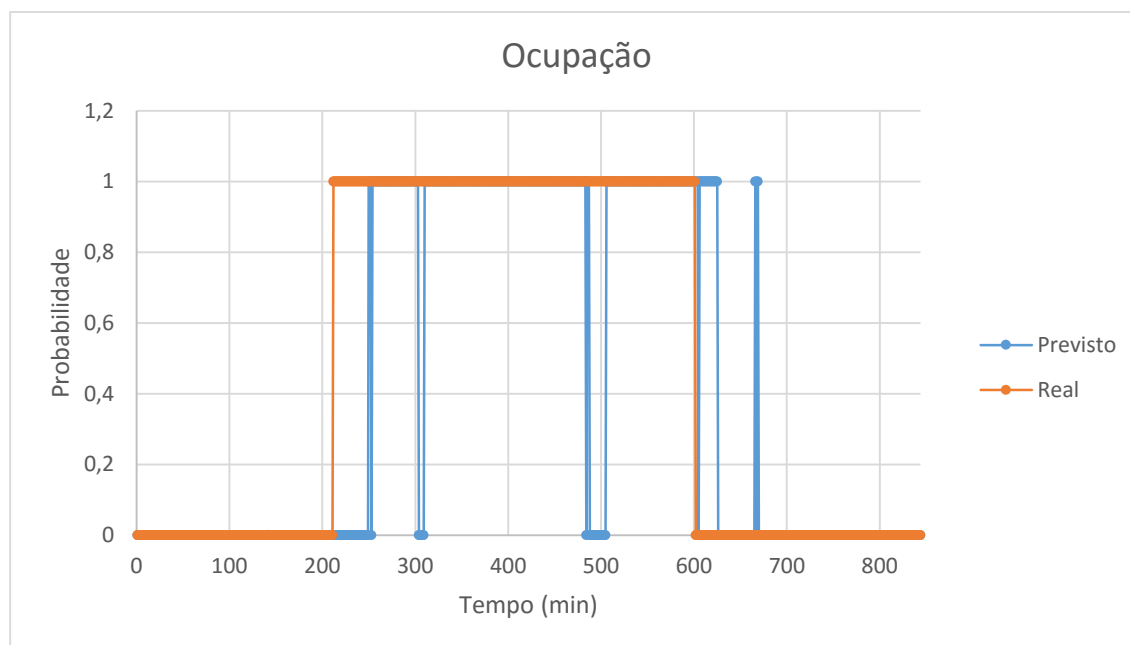


Figura 4.2 Ocupação real e prevista pelo algoritmo.

É ainda possível ver que embora o ocupante da divisão se tenha mantido nesta desde os 210 até os 600 minutos existem zonas onde o algoritmo indica que este se ausentou devido a descidas nos níveis de CO₂ quando na realidade este permaneceu sempre na divisão.

4.2 Velocidade de aumento do CO₂

A Velocidade de aumento do CO₂ está dependente de um grande número de fatores que a vêm influenciar além dos já anteriormente referidos.

O volume da divisão vai influenciar a velocidade de aumento do CO₂ no ar. Maiores volumes levam a velocidades mais baixas, levando a que grandes divisões demorem mais tempo a acumular CO₂ até níveis perçetíveis. Na Figura 4.3 é possível observar um aumento médio de aproximadamente 225 ppm, por hora, com apenas uma pessoa na divisão.

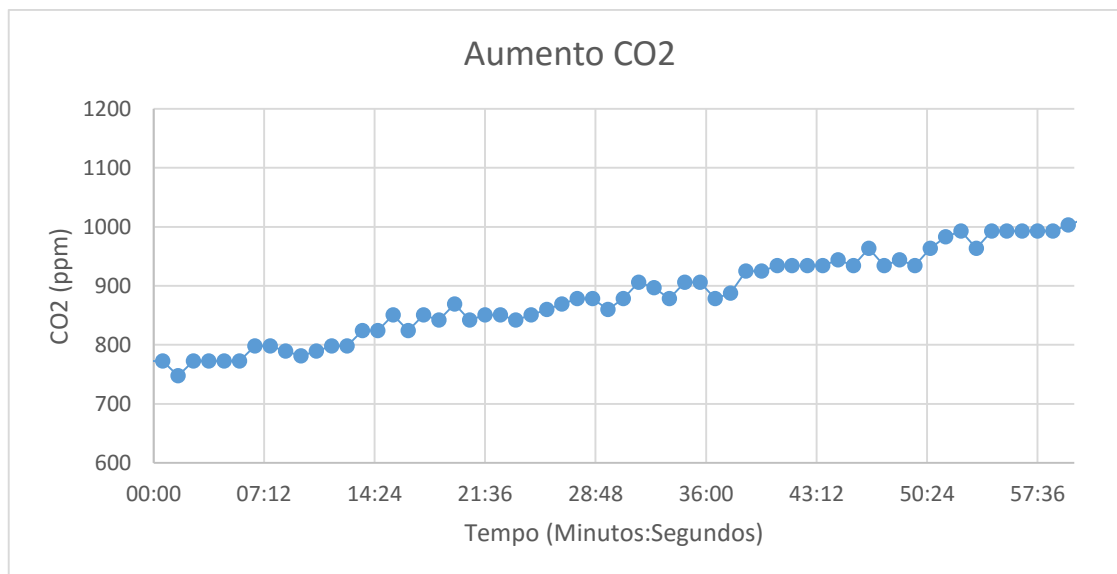


Figura 4.3 Perfil de CO₂, divisão com 40 m³, uma pessoa no interior

No entanto quando observamos uma divisão mais pequena com aproximadamente menos 10m³ de volume e com a mesma pessoa este valor é ligeiramente mais acentuado, tendo um aumento do valor médio de aproximadamente 350 ppm por hora com é possível observar na Figura 4.4.

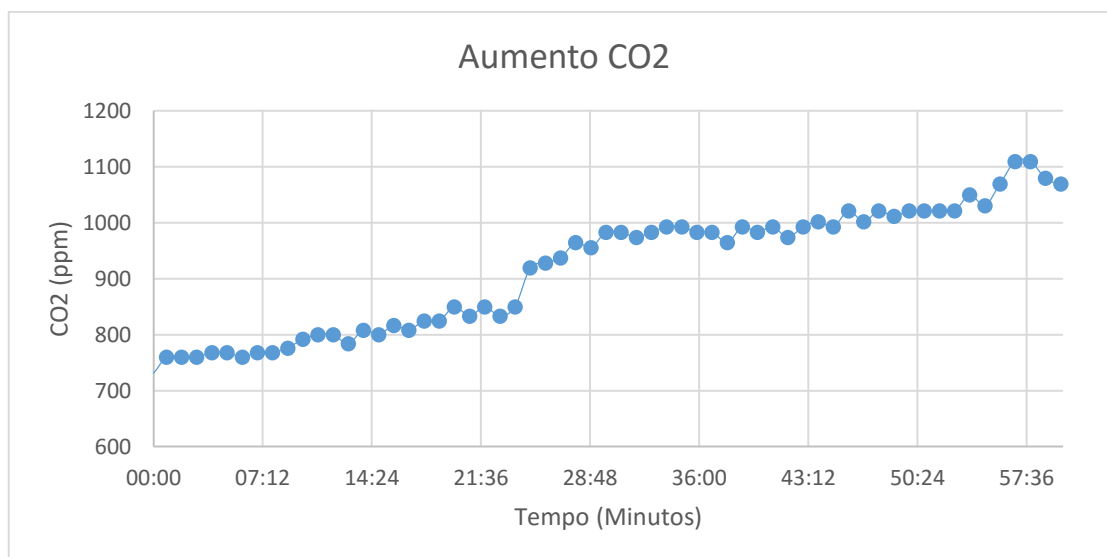


Figura 4.4 Perfil de CO₂, divisão com 30 m³, uma pessoa no interior

A velocidade de aumento de CO₂ no tempo poderia ser um dos métodos para saber qual o número de pessoas que se encontram na divisão ao invés de apenas ter em conta a sua ocupação, no entanto a generalidade das divisões dos edifícios não são estanques e

estão ligadas entre si geralmente por portas que muitas vezes não se encontram fechadas permitindo assim trocas gasosas entre divisões o que torna extremamente difícil o processo de quantificação do número de pessoas. Tem-se ainda questões de saturação dos níveis de CO₂ no ar, correntes de ar com o exterior, e janelas abertas entre outras causas de variação dos níveis de CO₂ que não podem ser previstas e que levam a grandes dificuldades no seu uso como variável de inferência para a quantidade de pessoas num determinado espaço, inviabilizando assim o seu uso para este fim.

4.3 Transferências de CO₂ entre divisões próximas

O gráfico da Figura 4.5 representa a situação de troca de gases entre divisões, neste caso de CO₂. É observável que dois dos quartos, o quarto com o módulo Local e o quarto com o módulo Remote1, tinham ocupantes durante o período noturno enquanto o outro quarto, Remote, não teve ninguém durante a totalidade deste período de tempo. De referir que a disparidade de valores entre os dois quartos ocupados se deve em parte à presença de uma grande quantidade de perfumes no interior do quarto com o sensor Remote1, o que levou a que houvessem interferência por parte destes nas leituras efetuadas pelo sensor e ainda pela presença de mais uma pessoa no quarto.

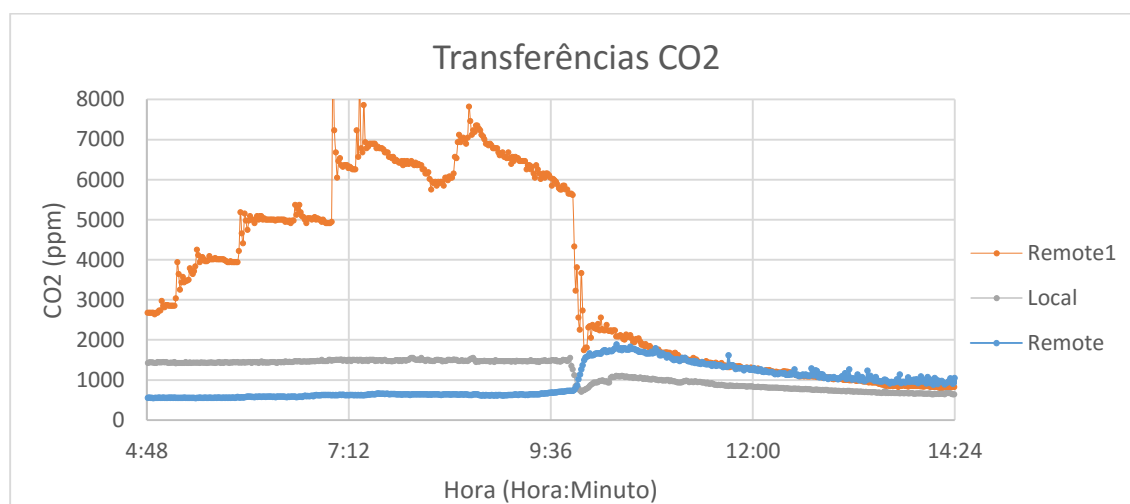


Figura 4.5 Troca gasosa entre quartos próximos

Aproximadamente às 10 horas da manhã ambas as portas dos quartos com pessoas são abertas levando a que o ar que se encontrava em ambos com alta concentração de CO₂ seja libertado para as outras divisões que lhes são próximas. É então visível que embora o quarto vazio assim o continuasse teve um grande aumento no seu valor médio de CO₂. Esta ocorrência leva a que haja um falso positivo associado à deslocação do ar. No entanto apenas recorrendo aos valores de CO₂ não é possível obter estas informações corretamente, pois neste período poderia passar a estar alguém nesta divisão e os dados observados pelos sensores de CO₂ seriam próximos aos que foram observados neste caso.

É ainda de referir o valor demasiado elevado no módulo Remote1, muito acima do que seria esperado, mesmo para as duas pessoas que se encontram sempre no interior do quarto, não sendo possível identificar o motivo de um valor tão alto, se por motivos de falha do sensor, ou por causas externas como perfumes ou aerossóis com compostos que afetem as leituras obtidas pelos sensores.

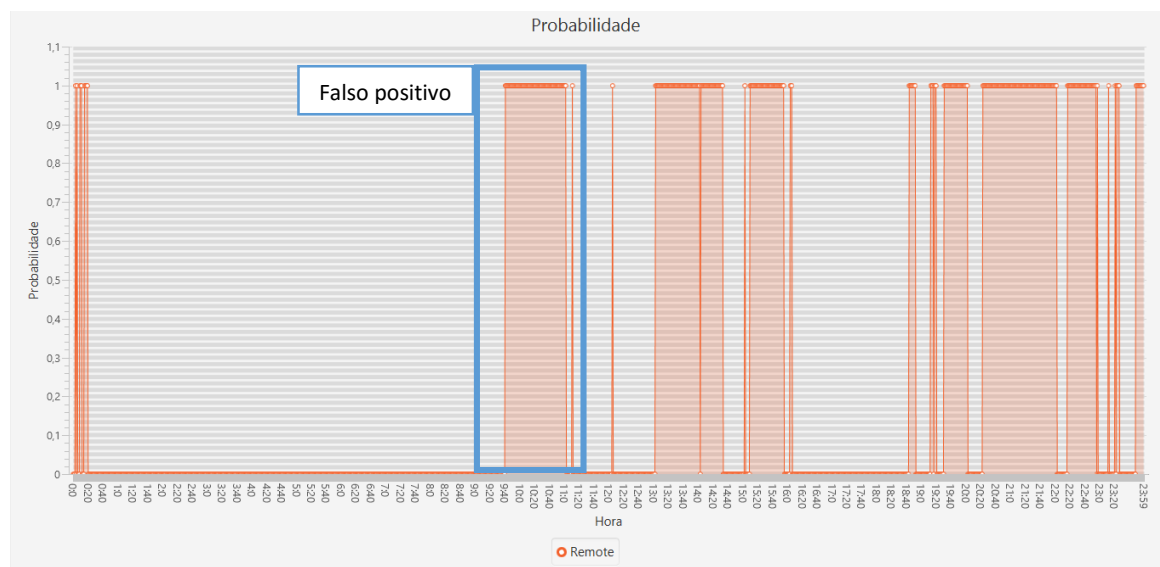


Figura 4.6 Ocupação do quarto com o módulo Remote

O falso positivo relativo a este caso é observável na Figura 4.6 que mostra o evoluir da probabilidade de ocupação do quarto que esteve vazio durante a noite. Durante todo o período noturno não houve qualquer ocupação até que acontece um falso disparo relativo às trocas gasosas entre quartos.

4.4 Previsão em condições reais

Este novo caso de teste tem como base um edifício de habitação com a configuração apresentada na Figura 4.7, esta representação não possui medidas exatas no entanto trata-se de uma reprodução bastante próxima da realidade. Os módulos foram colocados em divisões estratégicas e com diferentes tipos de utilização de forma a poder ter uma amostra o mais representativa possível e com vários casos diferentes.

A divisão em que se encontra o módulo local bem como o computador trata-se de um escritório com utilização esporádica e com períodos de permanência variável, com apenas uma porta de acesso e uma janela, estando a porta geralmente aberta. A divisão apresenta um volume de 30 m^3 .

O módulo Remote está localizado na maior divisão da casa, apresentando assim um desafio ao nível da velocidade de aumento dos valores de CO_2 no ar. Esta divisão é uma sala de estar, usada como lugar de concentração de pessoas na casa após as refeições e durante os períodos noturnos. Existem duas portas de ligação com outras divisões, bem como um total de cinco janelas que dão para o exterior da casa, estando estas por norma fechadas apenas com aberturas esporádicas e durante curtos intervalos de tempo. A divisão possui um volume de 150 m^3 .

O módulo final, Remote1, encontra-se na cozinha, que como seria de esperar é usada para elaborar as refeições da casa e ainda como zona de refeição, esta divisão é aquela que mais portas tem, levando a que exista uma grande propensão para a circulação de ar entre outras divisões bem como com o exterior por se tratar da principal entrada de pessoas na casa. A cozinha não está equipada com fogão a gás que poderia ser um causador de perturbações devido aos altos valores de CO_2 libertados na combustão dos gases usados nos fogões deste tipo, geralmente o propano ou o butano. O volume da divisão é de 45 m^3 .

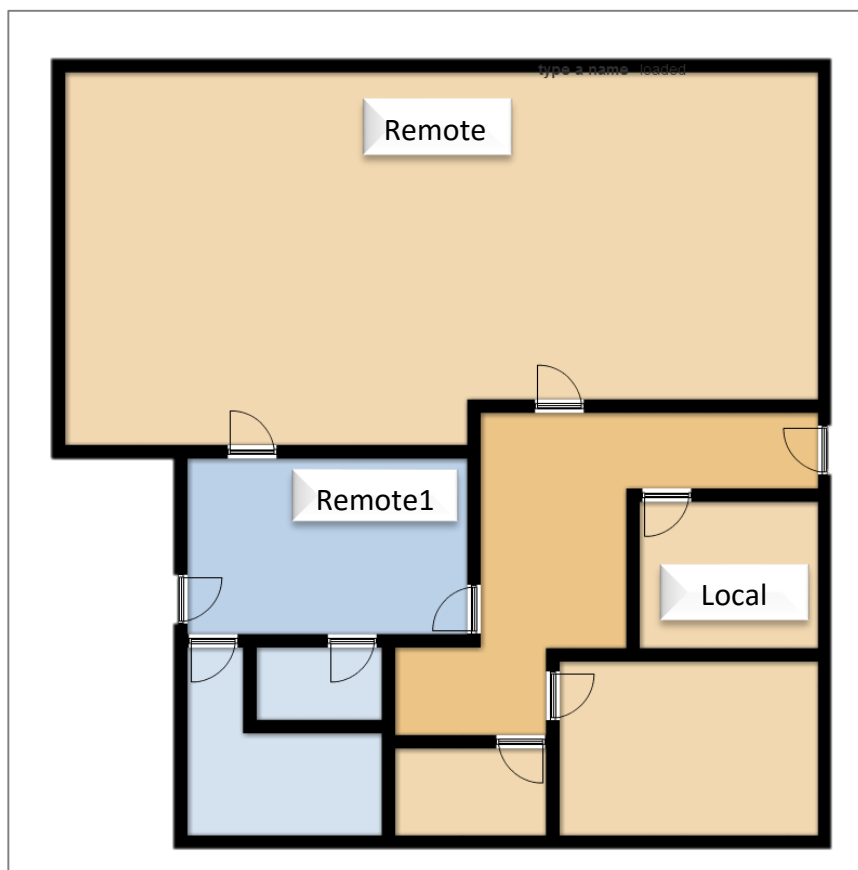


Figura 4.7 Planta representativa da habitação em análise

A abordagem no que diz respeito à análise e validação do comportamento do sistema em funcionamento foi feita tendo por base dados reais recolhidos para o efeito, sendo depois feito foco nos pontos como maior importância e nas situações mais representativas de forma a validar estes mesmos resultados.

A recolha de dados foi feita sem nenhuma alteração relativa aos hábitos dos ocupantes da casa para que esta se aproximasse o mais possível de uma implementação real deste sistema num edifício de habitação dito comum.

Existem alguns aspetos a ter em conta no que diz respeito às previsões que foram possíveis obter quando comparadas com outro tipo de edifícios com horários de trabalho fixo como seriam os de um edifício de escritórios ou equivalente. Por se tratar de uma vivenda em que existe livre acesso ao exterior e com uma grande irregularidade no que diz respeito à permanência dos vários utilizadores da casa, as previsões não

permitem ver padrões tão espaçados no tempo como seria de esperar, além do facto dos testes terem sido efetuados em alturas climatéricas relativamente amenas levando a maior interação dos habitantes com o meio exterior.

Serão apenas analisados individualmente dois dos quatro intervalos de dados recolhidos devido a grande quantidade de dados em questão, sendo apenas contabilizadas as probabilidades de ocupação da hora como um todo, no entanto será no final feita uma análise ao conjunto dos quatro períodos de forma a observar o comportamento do sistema ao criar um mapa completo da semana ao nível da utilização do rés-do-chão desta habitação.

Os intervalos temporais que serão analisados serão os dias de:

- 13 de Junho de 2015 a 19 Junho de 2015
- 24 de Junho de 2015 a 1 de Julho de 2015

4.4.1 Escritório de 13 a 19 Junho

O primeiro conjunto de dados diz respeito ao sensor que está ligado diretamente ao módulo local, e que se encontra no escritório da casa (Figura 4.8). O período de recolha de dados tem início no sábado dia 13 de Junho e fim na sexta-feira seguinte dia 19 de Junho.

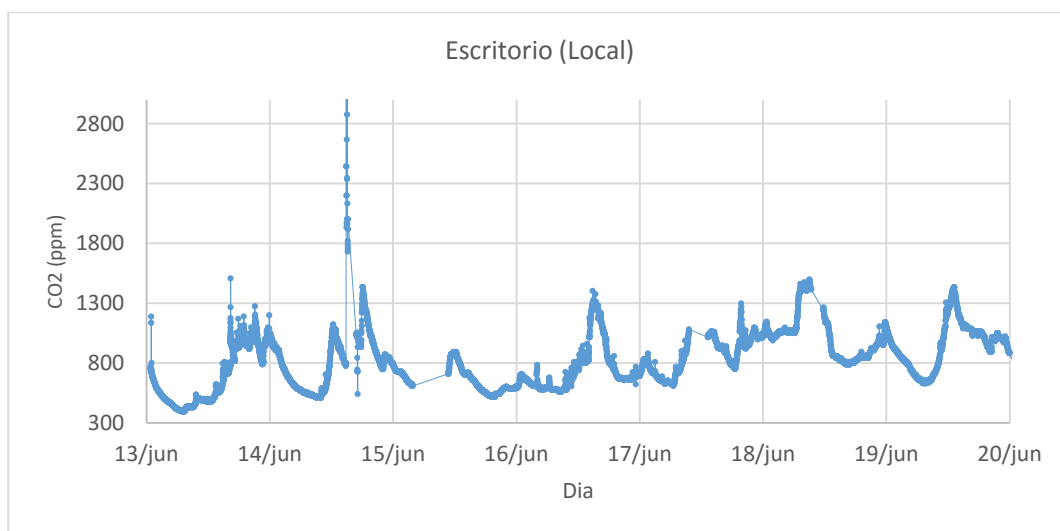


Figura 4.8 Nível CO₂ Escritório (Local), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

A previsão semanal de ocupação do escritório é visível na Figura 4.9, sendo o gráfico retirado diretamente da interface do sistema de previsão de ocupação.

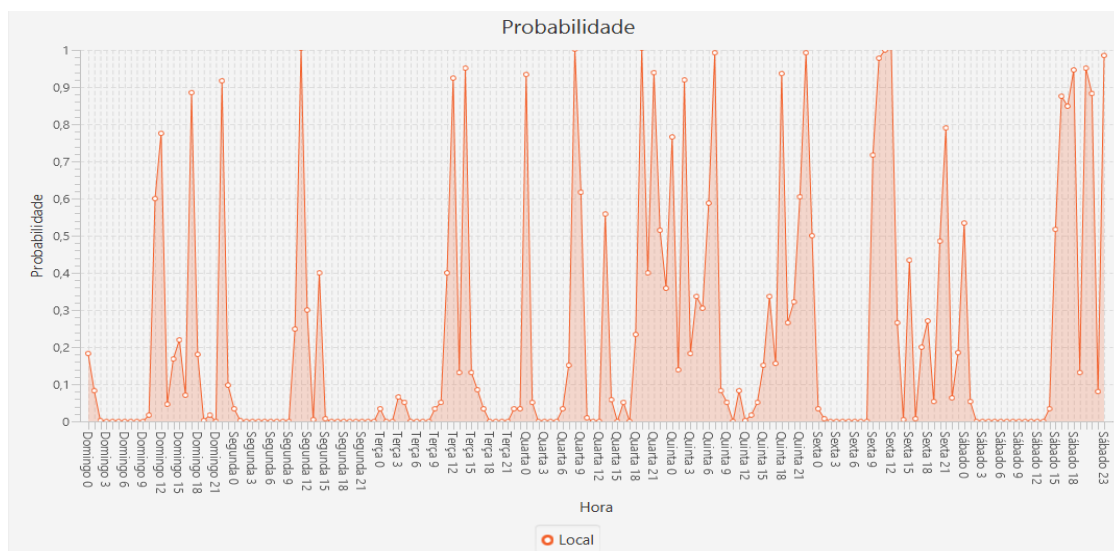


Figura 4.9 Ocupação Escritório (Local), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

4.4.2 Sala de 13 a 19 Junho

O segundo conjunto de dados é referente à sala, que como é possível observar na planta da casa é a maior divisão desta, apresentando os problemas já conhecidos devido ao seu grande volume. Na Figura 4.10 estão representados os níveis de CO₂ neste intervalo.

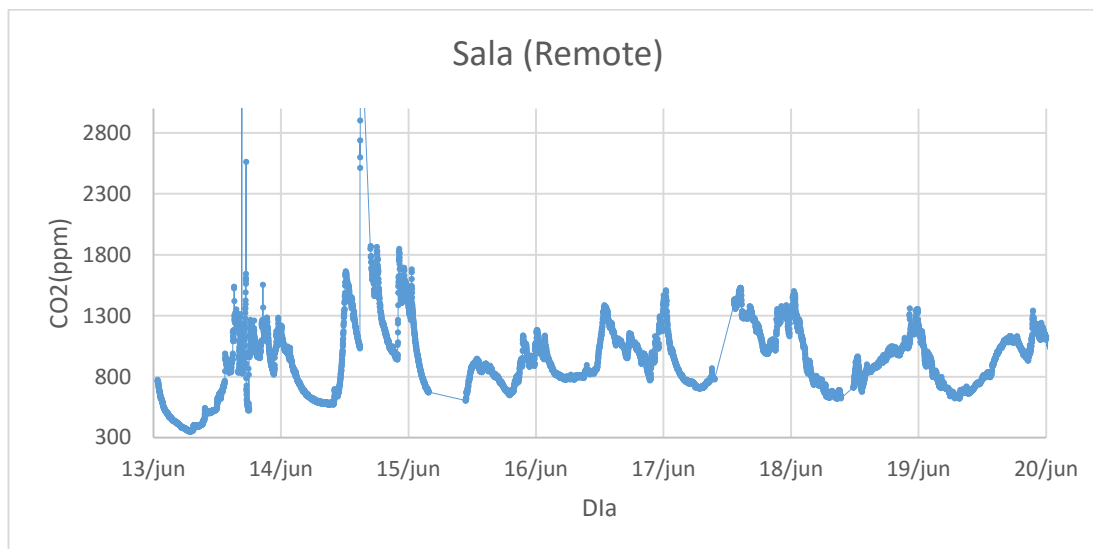


Figura 4.10 Nível CO₂ Sala (Remote), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

Comparativamente à ocupação observada no escritório (Figura 4.9) é observável uma maior ocupação ao longo do tempo (Figura 4.11), mantendo-se sempre os horários noturnos com uma probabilidade de ocupação bastante reduzida.

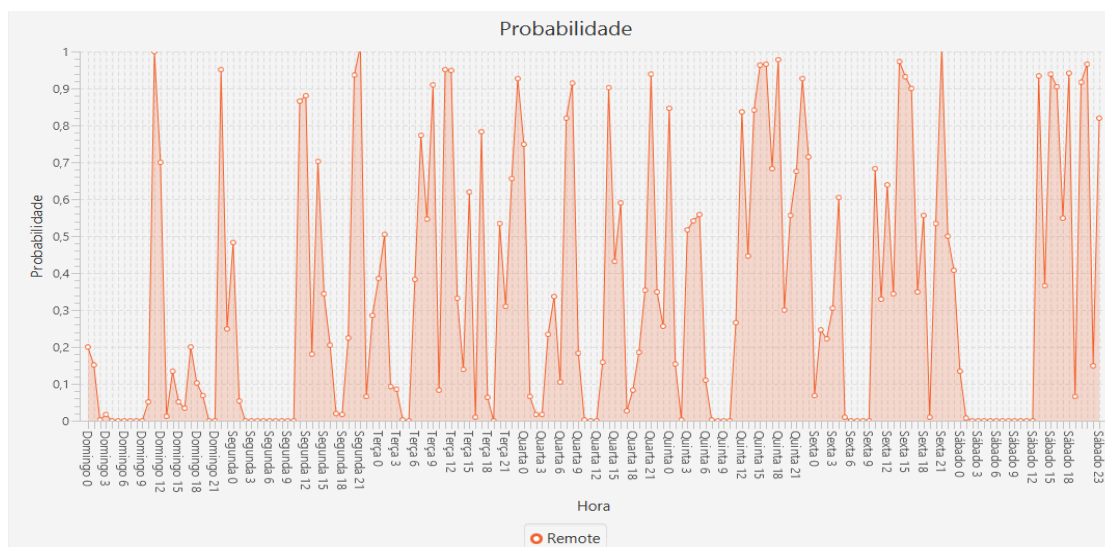


Figura 4.11 Ocupação Sala (Remote), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

4.4.3 Cozinha de 13 a 19 Junho

A cozinha por se tratar do ponto de maior passagem da casa devido a ter a porta principal de entrada na casa, está sujeita a correntes de ar mais frequentes que no resto das divisões, sendo apresentados na Figura 4.12 os níveis de CO₂ desta divisão.

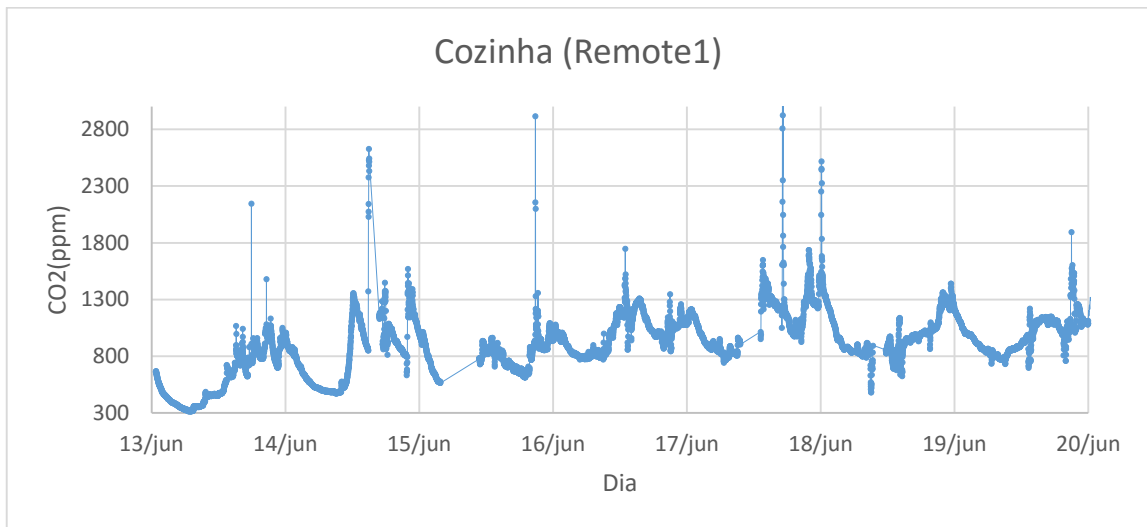


Figura 4.12 Nível CO₂ Cozinha (Remote1), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

Por se tratar de um ponto de passagem obrigatório existe uma grande quantidade de horas com probabilidade de ocupação da divisão, devido a estas entradas e saídas, sendo observável na Figura 4.13 esta intermitência.

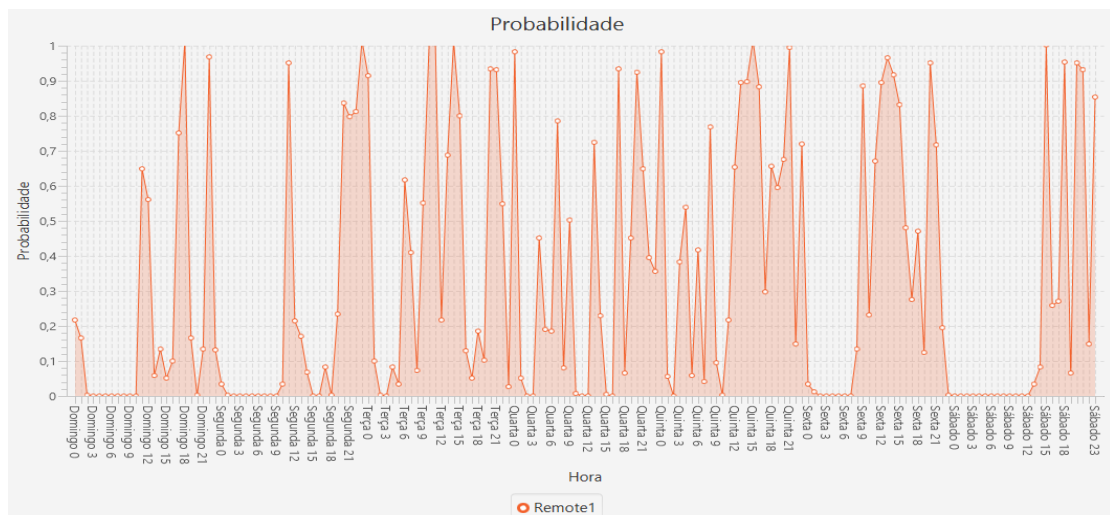


Figura 4.13 Ocupação Cozinha (Remote1), 13 (Sábado) a 19 (Sexta-feira) Junho

4.4.4 Escritório de 24 Junho a 30 Junho

É de referir os períodos temporais do final de dia 29 de Junho e durante todo o dia de 30 com comportamentos anormais por parte do sensor sem razão aparente (Figura 4.14).

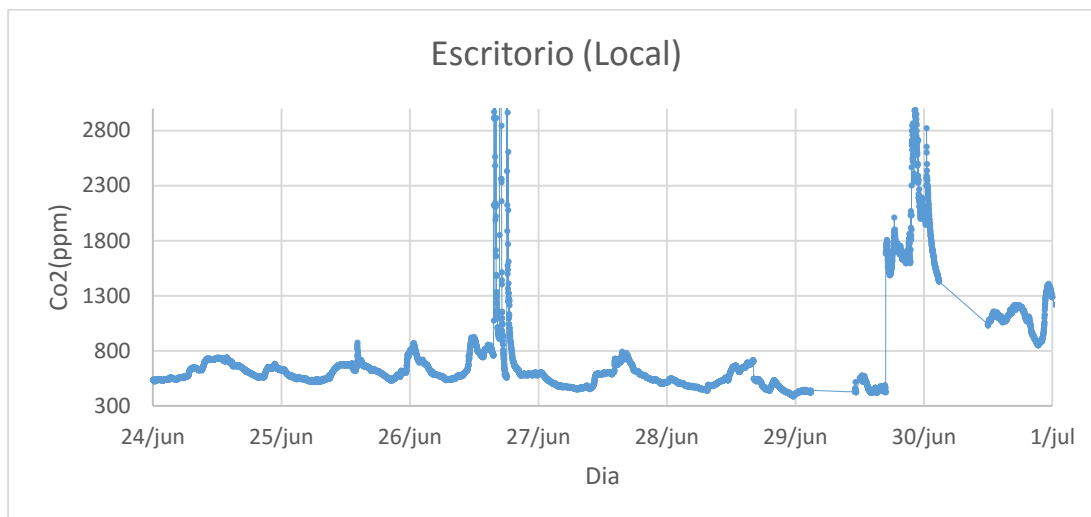


Figura 4.14 Nível CO₂ Escritório (Local), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

Quando observamos o comportamento do escritório neste período (Figura 4.15) é possível perceber houve muito menos tempo ocupação deste quando comparado com o período de 13 a 19 de junho.

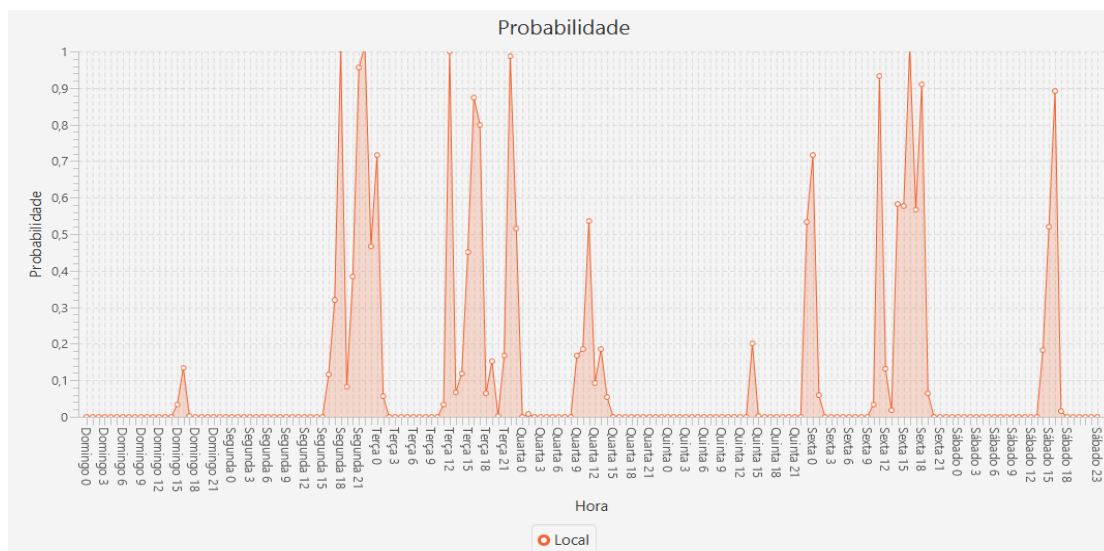


Figura 4.15 Ocupação Escritório (Local), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

4.4.5 Sala de 24 Junho a 30 Junho

Na Figura 4.16 é possível observar o perfil dos níveis de CO₂ ao longo do período de 24 a 30 de Junho na sala.

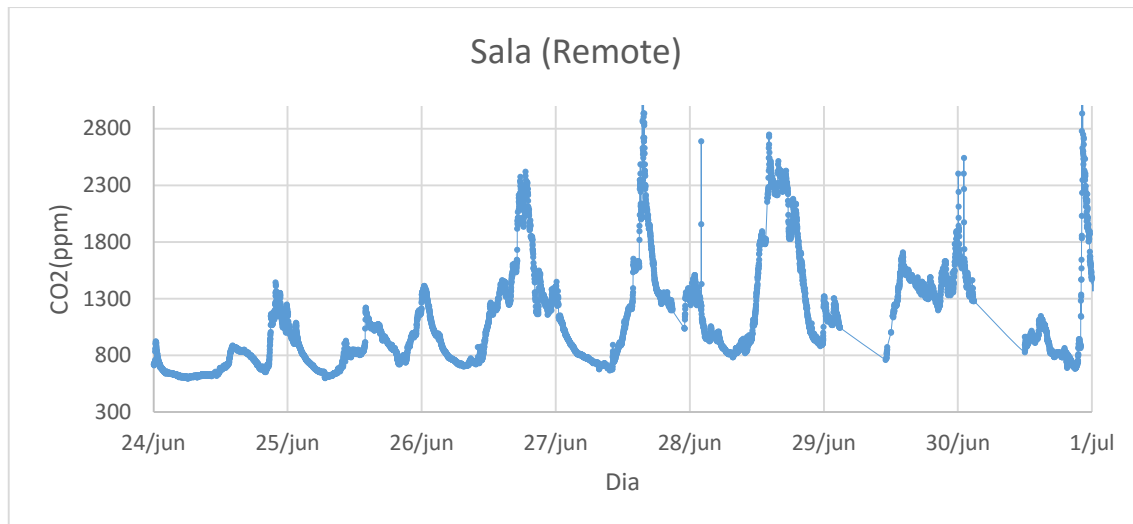


Figura 4.16 Nível CO₂ Sala (Remote), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

Analogamente ao período anteriormente visto (Figura 4.11) é possível ver claramente a ausência de pessoas durante os períodos noturno e da parte da tarde, no entanto menor demarcado na Figura 4.17.

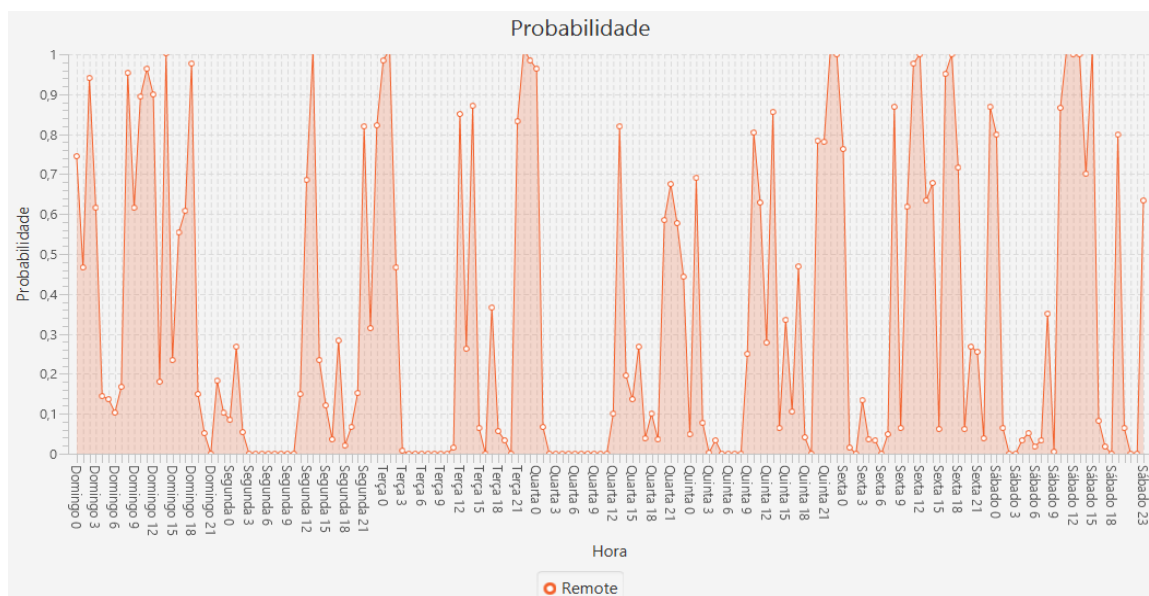


Figura 4.17 Ocupação Sala (Remote), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

4.4.6 Cozinha de 24 Junho a 30 Junho

Na Figura 4.18 é possível observar o perfil dos níveis de CO₂ ao longo do período de 24 a 30 de Junho na cozinha.

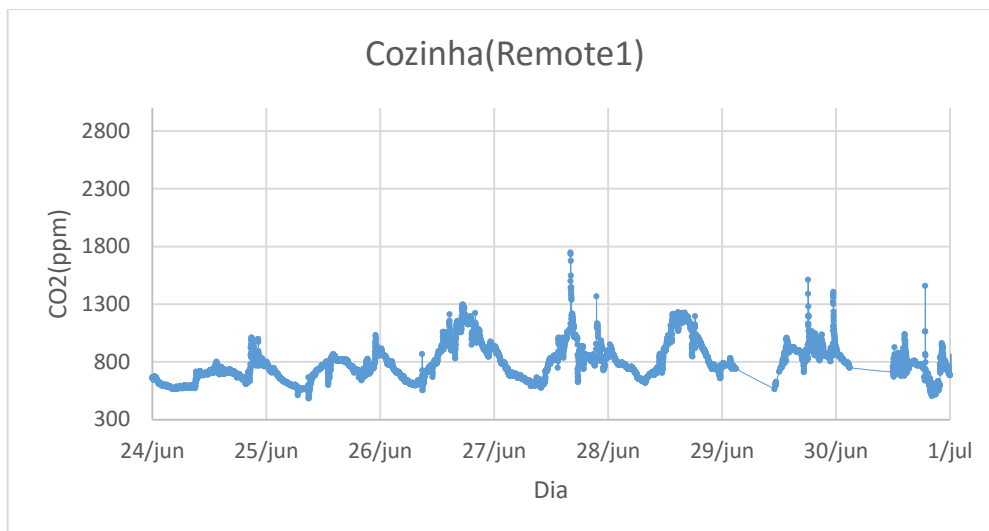


Figura 4.18 Nível CO₂ Cozinha (Remote1), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

Quando comparado com o período anteriormente visto para esta divisão é possível observar uma maior definição dos valores de ocupação em especial nos períodos de terça e quarta-feira, com uma maior diferença entre os períodos noturnos e diurnos (Figura 4.19).

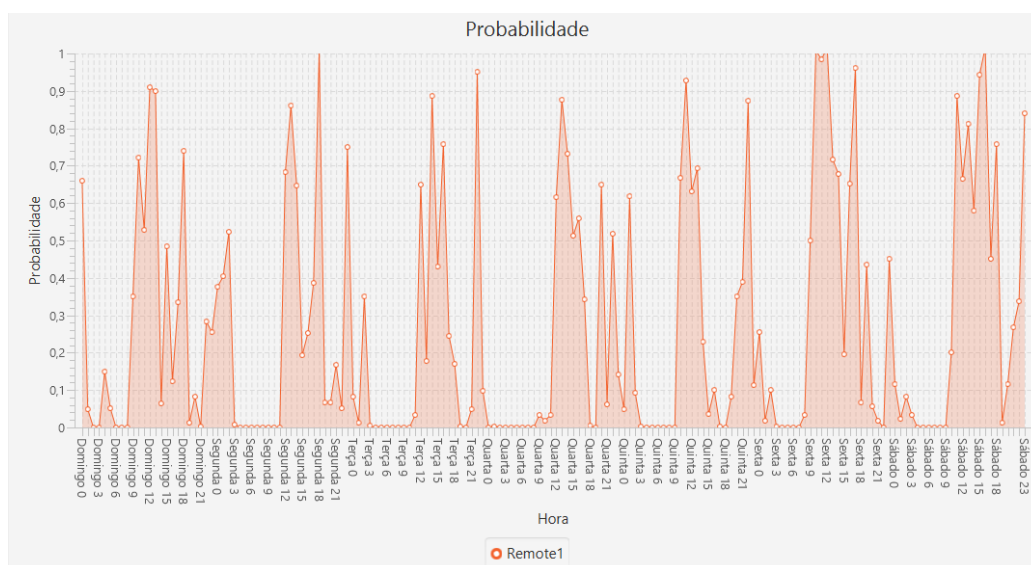


Figura 4.19 Ocupação Cozinha (Remote1), 24 (Quarta-feira) a 30 (Terça-feira) Junho

4.4.7 Análise dos períodos semanais

Os resultados obtidos nas três divisões denotam alguma falta de precisão em certas alturas do dia, em especial nos períodos da segunda metade do dia devido aos valores de CO₂ que permanecem no ar após os períodos de almoço, vindo afetar o desempenho da previsão, bem como pelos erros gerados devido a medições que se supõem erronias por parte dos sensores com comportamentos não satisfatórios em diversas ocasiões.

Os períodos noturnos a partir da meia-noite, têm um bom valor de previsão pois são geralmente inferiores a 10% o que revela a ausência de pessoas na divisão. Este valor vem de encontro com a realidade vivida pelos ocupantes da casa pois por norma a seguir à meia-noite existe uma deslocação dos ocupantes da casa para outro andar para irem dormir nos seus quartos sendo normal os valores da ocupação se encontrarem perto de 0%. É também observável que os fins-de-semana apresentam uma ocupação durante o decorrer do dia mais alta do que aquela que é observável durante a semana, em especial na sala e cozinha. Existem por vezes disparos isolados com valores bastante altos com períodos de permanência demasiado curtos para se tratar de CO₂ introduzido por humanos e que aparecem por razões desconhecidas, estes valores foram atribuídos aos sensores de CO₂ devido à sua natureza de fabrico apresentando por vezes comportamentos indesejáveis como já foi relatado anteriormente.

Em suma os sensores detetam a presença com exatidão de longos períodos de tempo com ou sem desocupação mas pela natureza do CO₂ e do seu comportamento no ambiente fechado do edifício de habitação existem vários intervalos temporais que revelam alguma inercia no que diz respeito à mudança de estado de ocupação. Pode assim verificar-se que o sistema não tem uma boa resposta no que diz respeito às frequências altas nas saídas e entradas de divisões em curtos espaços de tempo. É ainda de referir que as falhas observáveis nos dados obtidos nos períodos da manhã de 15,29 e 30 de Junho, se devem aos cortes na distribuição elétrica e que aliado ao facto dos módulos não possuírem capacidade para continuarem em funcionamento sem a energia desta gera as referidas falhas na continuidade dos dados.

4.4.8 Dados cumulativos

Foi ainda feito o uso do sistema com a totalidade das suas funções, o uso de várias semanas de recolha de dados de forma a conseguir obter mais claramente quais os períodos de maior ocupação das várias divisões, foram então usados 4 períodos de dados de forma a obter uma previsão da ocupação das várias divisões.

De forma a ser possível observar com maior detalhe a reação do sistema à maior quantidade de dados apenas será feita a análise de uma única divisão num único dia da semana, neste caso o dia e a divisão escolhidos foi a terça-feira e a sala (Remote).

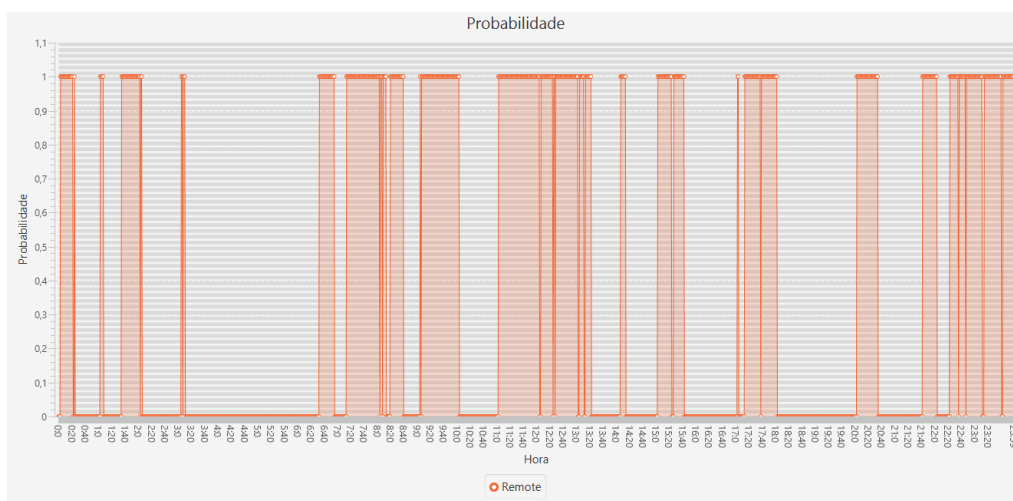


Figura 4.20 Ocupação terça-feira, uma semana de dados, Sala (Remote)

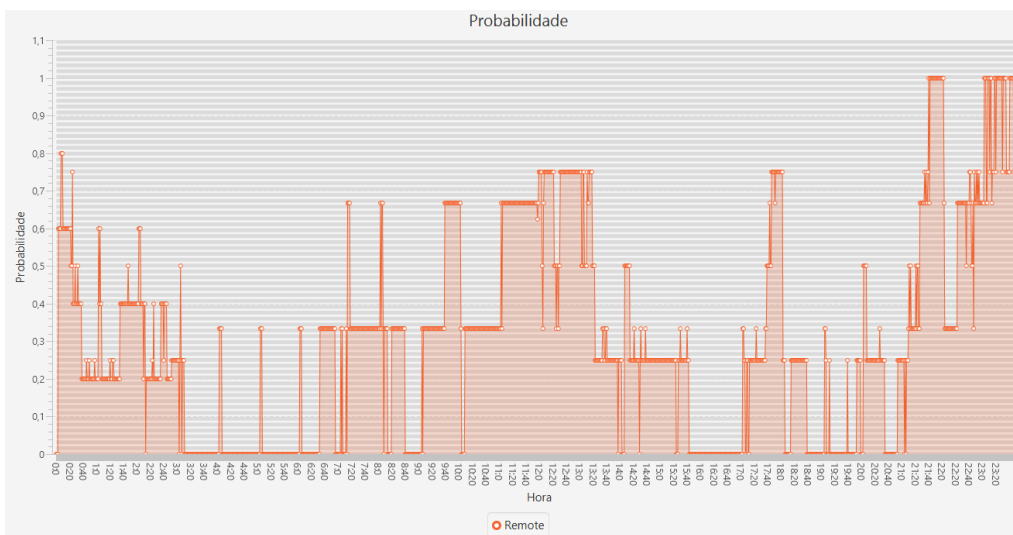


Figura 4.21 Ocupação terça-feira, quatro semanas de dados, Sala (Remote)

Como é possível observar a ocupação sofre uma considerável mutação com o acumular da informação das várias semanas, como será de esperar com mais dados mais precisa esta se tornará, sendo cada vez mais fácil observar zonas do dia tendencialmente ocupadas relativamente a outras.

Quando analisada a Figura 4.20 relativamente à Figura 4.21 em que existe uma maior quantidade de informação, é possível notar que os períodos de ocupação estão bastante mais definidos com os espaços temporais das 8 horas da manhã, almoço e jantar a serem os principais período com presença, refletindo as vivências dos ocupantes da casa. O valor médio da probabilidade de ocupação à Terça-feira também sofreu alterações diminuindo de 40% para 35% ao final das quatro semanas. É no entanto necessário ter em consideração que este acumular de informação não poderá ser contínuo ao longo toda a duração do ano. Diferentes épocas do ano têm influência no comportamento das pessoas bem como mudanças nas rotinas por razões pessoais ou profissionais, sendo importante ter em conta esta possível sazonalidade em futuras abordagens ao problema.

4.5 Relação ocupação consumo elétrico

Embora não tenha sido criado um sistema de classificação das várias divisões tendo em conta os seus perfis de consumo elétrico, por não ser uma abordagem viável, muito por culpa da falta de capacidade do sistema com base em CO₂ de permitir obter ocupações instantâneas das várias divisões, bem como o número exato de ocupantes e ainda pelo facto de haverem influências entre divisões devido a circulações de ar. No entanto é ainda assim possível tirar algumas conclusões entre o nível de ocupação total da casa fornecido pelo algoritmo e os consumos elétricos desta.

Com o perfil de ocupação das divisões que foi obtido no final de quatro semanas de aquisição de dados, podemos então fazer a correlação cruzada com os dados do consumo elétrico da habitação de forma a tentar encontrar a relação entre os valores de ocupação obtidos e os consumos elétricos da habitação. Tendo informação das

ocupações das três divisões mais significativas da casa em altura de atividade, representadas nas figuras Figura 4.22, 4.23 e 4.24, é então possível gerar um mapa de ocupação total da casa por extrapolação da informação destas divisões. Mais uma vez apenas será focado um dia específico para que seja mais fácil a apresentação de resultados devido à grande quantidade de informação que seria necessário expor numa figura para um período de tão longa duração.

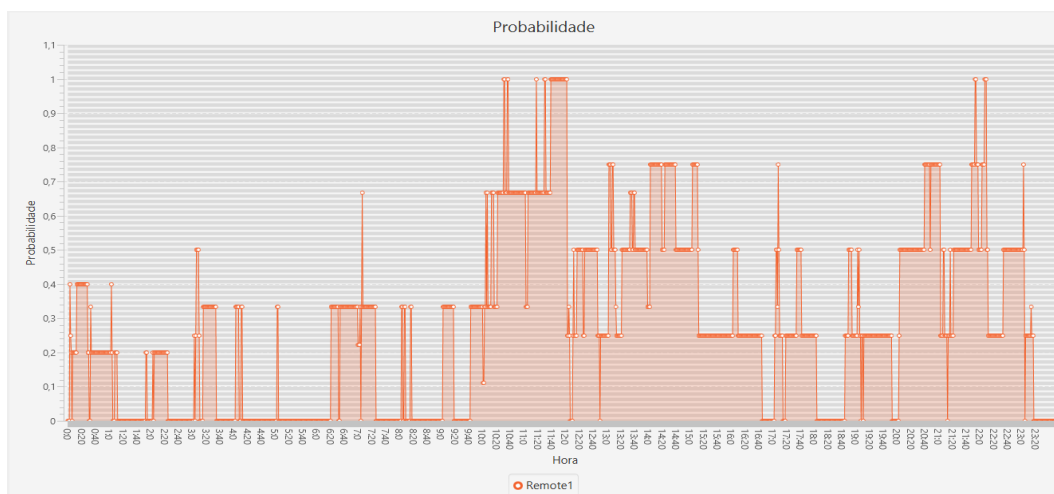


Figura 4.22 Ocupação Terça-feira, 4 semanas acumuladas, Cozinha (Remote1)

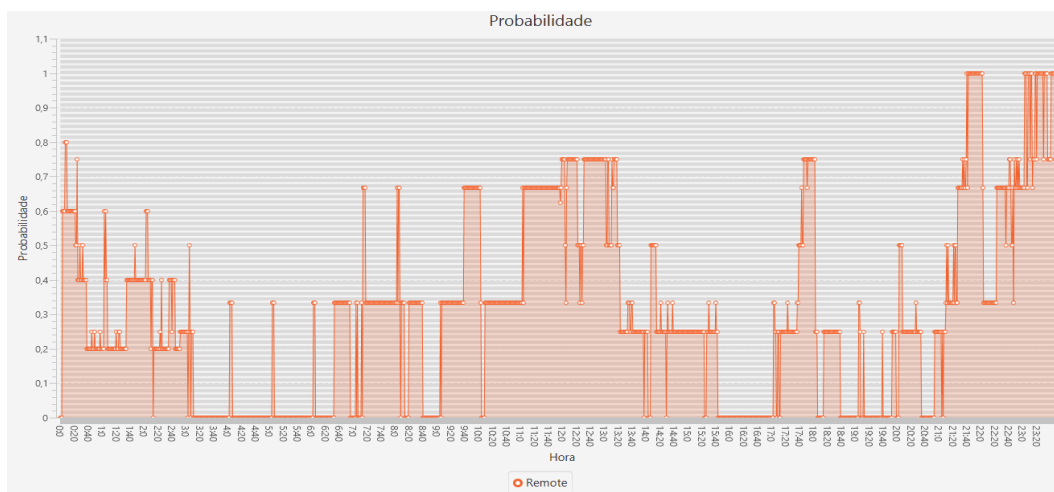


Figura 4.23 Ocupação Terça-feira, 4 semanas acumuladas, Sala (Remote)

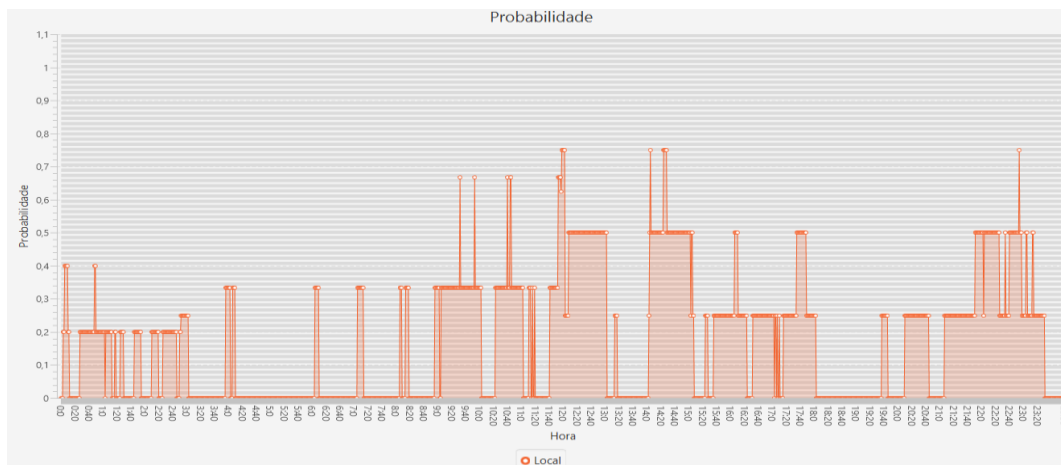


Figura 4.24 Ocupação Terça-feira, 4 semanas acumuladas, Escritório (Local)

Usando os valores máximos entre as várias divisões podemos então criar um mapa com a ocupação da casa durante o período de atividade. Na Figura 4.25 é possível ver o resultado desta junção. Estes dados foram obtidos através de métodos externos ao programa criado para o sistema de ocupação por CO₂ neste caso o Matlab pela sua grande robustez no que respeita a tratamento de dados das mais variadas áreas.

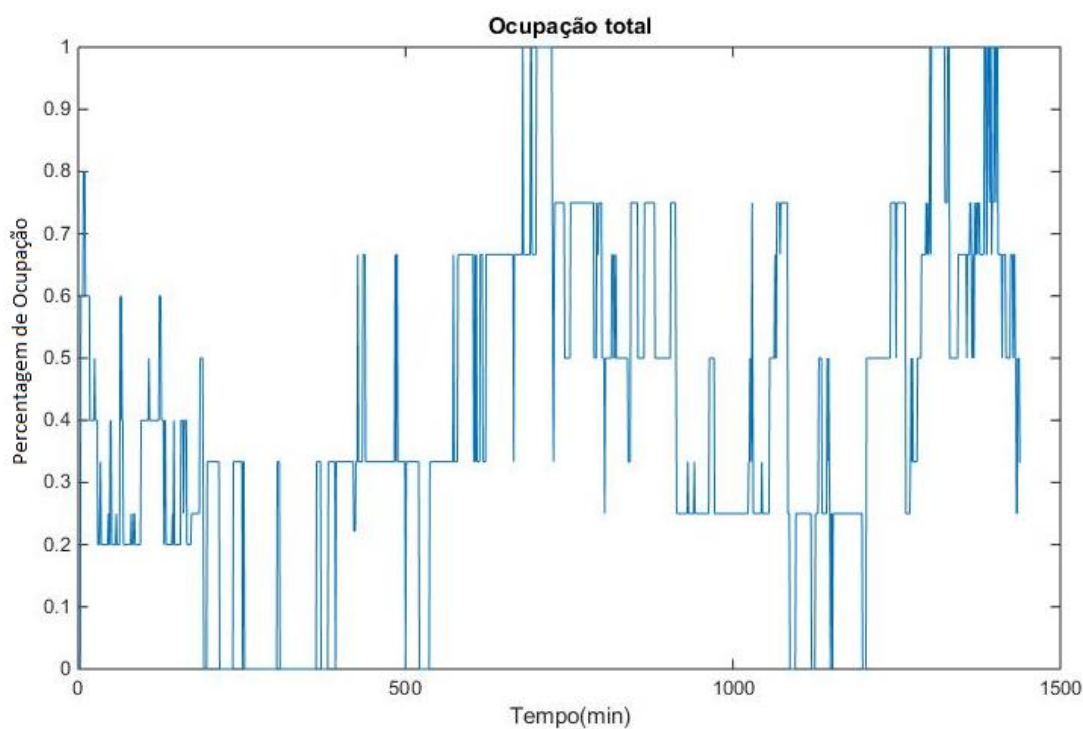


Figura 4.25 Ocupação total da habitação a uma terça-feira

Na Figura 4.26 é observável o consumo da habitação durante um período completo de 24 horas de uma terça-feira, no entanto existem duas zonas com valores que são um entrave à análise a efetuar, estas zonas assinaladas no gráfico da Figura 4.26 são referentes a consumos externos ao interior da habitação, nomeadamente equipamentos usados para efetuar a rega dos jardins circundantes da casa, não fazendo portanto sentido correlacionar os valores de ocupação da casa com estes consumos.

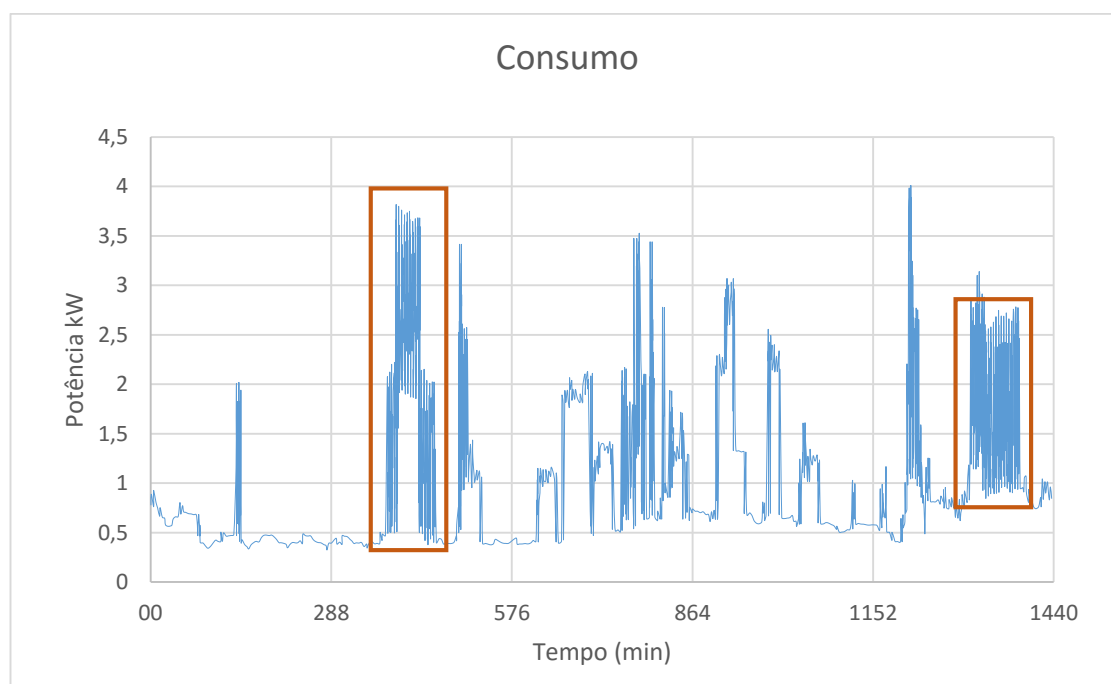


Figura 4.26 Consumo da habitação durante uma terça-feira, a vermelho, zonas de consumo externo à casa

Fazendo a remoção destas zonas de alto consumo por aquele que seria o consumo previsto para estas alturas, embora se trate de uma alteração aos valores obtidos vem permitir obter valores muito mais próximos dos consumos internos da casa do que se esta extrapolação não tivesse sido feita. Na Figura 4.27 é possível observar o consumo já sem estas zonas e com uma média móvel aplicada de forma a serem mais explicitas as tendências do consumo ao longo do dia.

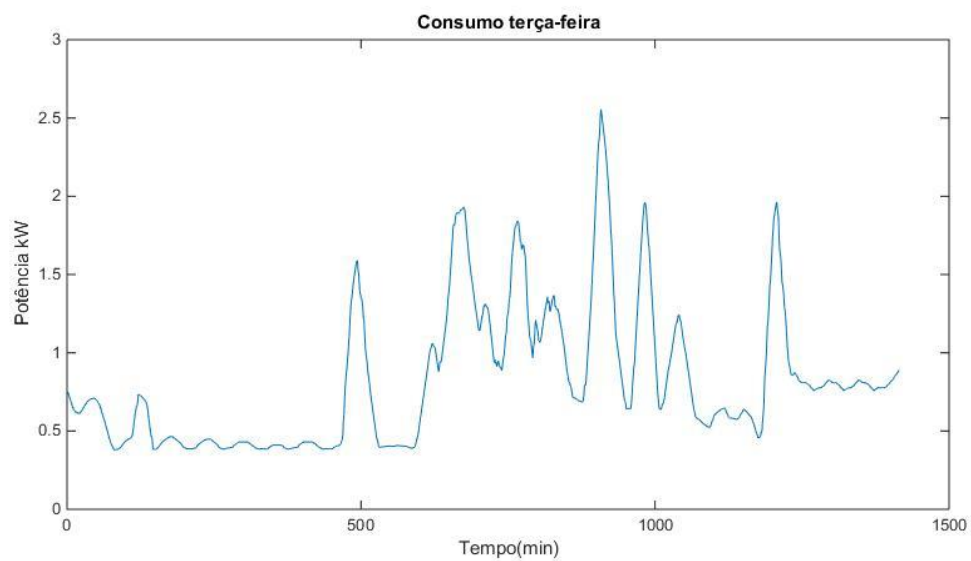


Figura 4.27 Consumo interno da habitação com média móvel aplicada

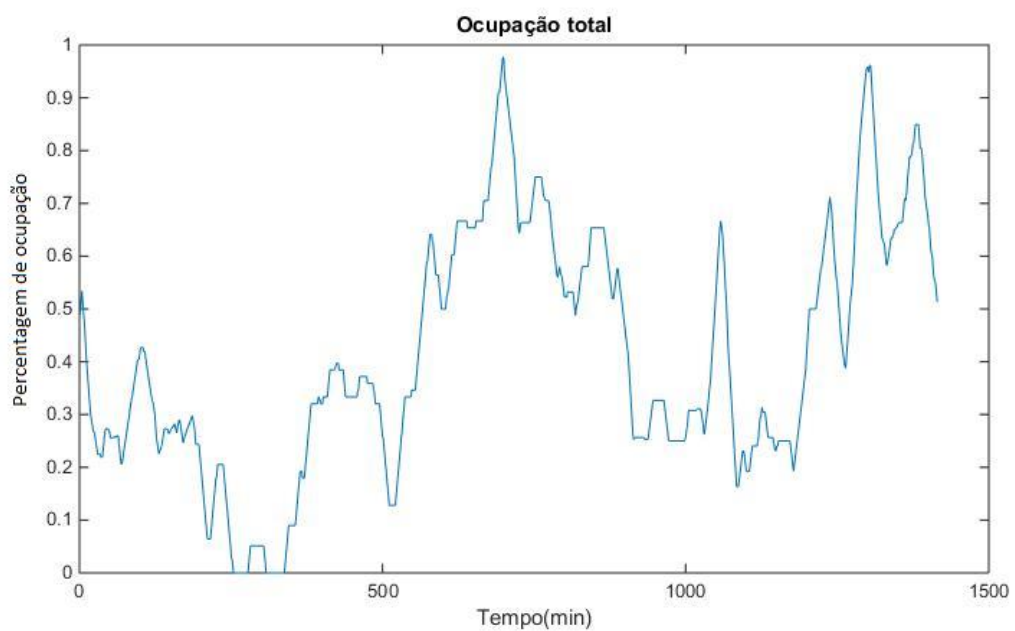


Figura 4.28 Média móvel da ocupação da habitação

Quando efetuada a correlação cruzada, Figura 4.29, entre os dados relativos à ocupação da casa e do consumo elétrico, o maior valor de correlação obtido é de 0,7967 e é observado no atraso 4 (Figura 4.29). O que é observável através destes valores é que a relação entre o consumo elétrico e a previsão de ocupação da habitação tem uma

relação moderada a elevada, levando assim a crer que em abordagens futuras é possível utilizar de forma positiva o CO₂ para inferir os níveis de consumo de uma habitação.

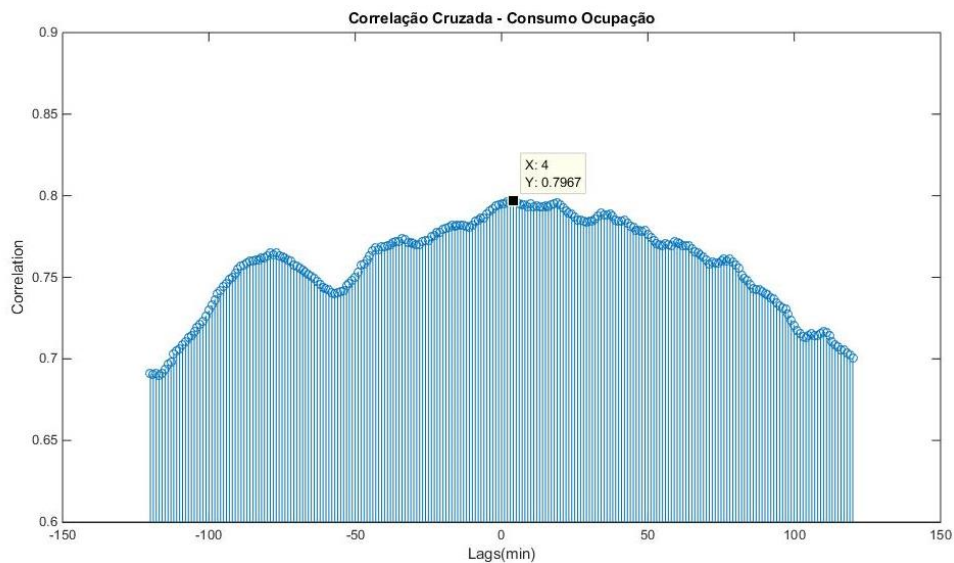


Figura 4.29 Correlação entre a ocupação e o consumo

Tendo em conta todas as limitações que o CO₂ nos impõem este valor de correlação entre a ocupação e o consumo é um bom indicador do correto funcionamento do sistema de ocupação com os consumos elétricos relacionados com a presença de pessoas na habitação, como seria espectável, pois a presença de pessoas está em muito ligada aos aumentos de consumo como descrito em [13], levantando a possibilidade que mais trabalho poderá ser desenvolvido nesta área no futuro.

Conclusões

Esta dissertação tinha como premissa criar um sistema que visasse permitir saber qual a ocupação de um edifício, neste caso de habitação. O método a ser explorado para criar este mapa de ocupação do edifício foi a análise da concentração do dióxido de carbono, que se trata de um dos produtos do metabolismo humano.

O sistema foi implementado tendo como base a criação de módulos sem fios que seriam colocados em várias divisões da casa de forma a poderem ser obtidos os valores da concentração de CO₂ destas e assim conseguirem ser extraídas informações acerca do estado de ocupação ao longo da semana.

O sistema foi concluído com êxito, permitindo fazer a recolha dos dados das várias divisões de uma forma imediata e sem fios através de módulos criados para este efeito. Foi então criado um mecanismo de inferência através da variável CO₂. No entanto um grande número de problemas condiciona um sistema de previsão apenas baseado em CO₂. Problemas como os longos períodos de permanência do CO₂ e transferências gasosas entre as várias divisões bem como com o exterior têm grande influência nos resultados que são possíveis obter, limitando a precisão que é possível alcançar.

O CO₂ como variável única de um sistema de previsão apenas possui valores ótimos em condições controladas, com divisões com extração imediata de ar após a saída da pessoa do local, ambiente sempre com ar limpo vindo do exterior e sem trocas de ar entre as salas próximas, algo que dificilmente podemos encontrar num edifício de habitação dito comum.

Como seria de esperar foi observada uma relação entre os dados obtidos de ocupação dos espaços e os consumos elétricos da habitação, não sendo no entanto possível relacionar individualmente cada uma das divisões com os consumos, em grande parte

devido aos problemas de influência entre divisões e ainda relacionado com o facto de apenas ser possível inferir a presença sem valor quantitativos do número de pessoas.

Após os testes efetuados conclui-se assim que embora o CO₂ possa ser uma forma prática de colocar um sistema de monitorização e previsão da ocupação numa casa, não retorna os resultados desejados quando comparado com outras técnicas de análise de ocupação disponíveis como os sensor de movimento por infravermelhos, para nomear apenas um exemplo.

Melhorias e oportunidades para o futuro

O uso de CO₂ como variável única de um sistema de análise de ocupação não será a melhor escolha para obter uma previsão precisa, no entanto no futuro e com o aparecimento de cada vez mais sistemas multivariável, o CO₂ poderá ser um aliado importante na criação de sistemas mais exatos, que fazem uso da cada vez mais informação disponível através da chegada de meios de comunicação até aos mais simples dos equipamentos com o advento da *Internet of Things*.

Como foi possível observar um sistema tendo em conta uma habitação dita normal não apresenta os comportamentos que seriam desejados, no entanto uma abordagem que poderia ser feita em caso de haver sistemas de extração de ar, seria criar um sistema para analisar a velocidade a que o CO₂ estaria a ser produzido e tirar relações a partir daí, usando o volume de saída de ar e a quantidade de CO₂ presente neste um pouco em semelhança à abordagem usada em [30], embora esta abordagem vá contra o desejo de criar um sistema de fácil disseminação e com vista em habitações já construídas. No entanto o CO₂ continuará a ser sempre uma variável com grandes dificuldades associadas por todas as razões já mencionadas ao longo desta dissertação, levando sempre a desempenhos fortemente limitados.

Como nota final fica ainda a escolha de outro tipo de sensores, como os NDIR para uma melhor precisão, que poderia em muito ajudar na melhoria da recolha de dados. Os sensores químicos mostram ser demasiado imprevisíveis no seu comportamento, como desvios da calibração constantes, bem como situações em que ficaram constantes em determinados valores.

Bibliografia

- [1] Internacional Energy Agency, “World Energy Outlook”, <http://www.worldenergyoutlook.org/>. [Acedido em Agosto 2015].
- [2] Internacional Energy Agency, “IEA offers a blueprint for a sustainable buildings sector by 2050” , www.iea.org. [Acedido em Agosto 2015].
- [3] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Estrategia Nacional para Renovação de Edifícios” Portugal, 2014.
- [4] EnerBuilding.eu, “Eficiência Energética nos Edifícios Residenciais”, <http://www2.adene.pt/> , Lisboa, 2008.
- [5] L. Pitt, P. Green e B. Lennox, “A sensor network for predicting and maintaining occupant comfort” em *Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, Trento, 2013.
- [6] K. Yang, “Inferring Occupancy from Opportunistically Available Sensor Data” *IEEE International conference on Pervasive Computing and Communication*, 2014.
- [7] M. Berger e A. Armitage, “Room occupancy measurement using low-resolution infrared cameras”, *Signals and Systems Conference*, 2010.
- [8] F. Chen, “A Video-Based Indoor Occupant Detection and Localization Algorithm for Smart Buildings” *Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*, p. 565-573, 2009.
- [9] S. Li, N. Li, B. Becerik-Gerber e G. Calis, “Rfid-based occupancy detection solution for optimizing HVAC Energy Consumption” em *2011 Proceedings of the 28th ISARC*, Seoul, Korea, 2011.

- [10] S. Mamidi, R. Maheswaran e Y.-H. Chang, "Smart Sensing, Estimation, and Prediction for Efficient Building Energy Management," em *Multi-agent Smart Computing Workshop*, 2011.
- [11] R. Melfi, B. Rosenblum, B. Nordman e K. Christensen, "Measuring building occupancy using existing network infrastructure" *Green Computing Conference and Workshops* , 2011.
- [12] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi Alliance", www.wi-fi.org. [Acedido em Maio 2015].
- [13] D. Chen, S. Barker, A. Subbaswamy, D. Irwin e a. P. Shenoy, "Non-Intrusive Occupancy Monitoring using Smart Meters" em *BuildSys'13 Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings*, New York, 2013.
- [14] W. Kleiminge, T. Staake e S. Santini, "Occupancy Detection from Electricity Consumption Data" em *BuildSys'13 Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings*, New York, 2013.
- [15] A. Demianiuka e K. Gładyszewska-fiedoruka, "The changes of carbon dioxide concentrationIn a cinema auditorium " *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, p. 105-110, 2010.
- [16] S. J. Emmerich e A. K. Persily, "Literature Review on CO2-Based Demand - Controlled Ventilation," *ASHRAE Transactions*, vol. 103, 1997.
- [17] Edaphic Scientific, "NDIR explained" , <http://www.edaphic.com.au/knowledge-base/articles/gas-articles/ndir-explained/>. [Acedido em Junho 2015].
- [18] S. Meyn, A. Surana, Y. Lin e S. M. Oggianu, "A Sensor-Utility-Network Method for Estimation of Occupancy in Buildings" em *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and*, Shanghai, P.R. China, 2009.
- [19] M. Jin, N. Bekiaris-Liberis, K. Weekly, C. Spanos e A. Bayen, "Real-Time Occupancy Detection using Decision Trees with Multiple Sensor Types," em *SimAUD '11 Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, San Diego, 2011.

- [20] K. Poh Lam, M. Höynck, B. Dong, B. Andrews, Y.-S. Chiou e R. Zhang, “Occupancy detection through an extensive environmental Sensor network in an open-plan office building” em *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland, 2009.
- [21] D. Worner, T. Bomhard e F. Wortmann, “Poster Abstract: Occupancy-based heating control for residential buildings using environmental sensors,” em *Buildsys’13* , Roma, Italy, 2013.
- [22] E. Naghiyev, M. Gillott e W. Robin, “Three unobtrusive domestic occupancy measurement technologies” *Energy and Buildings*, vol. 69, p. 507–514, 2014.
- [23] CO2 Now, “<http://co2now.org/>”, <http://co2now.org/>. [Acedido em Fevereiro 2015].
- [24] T. Z. Alliance, “The ZigBee Alliance,” , <http://www.zigbee.org/>. [Acedido em Junho 2015].
- [25] N. A. Somani e Y. Patel, “Zigbee: a low power wireless technology for industrial applications,” em *International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM) Vol.2*, 2012.
- [26] R. Faludi, *Building Wireless Sensor Networks*, O'Reilly, 2010.
- [27] DIGI, “XBee and ZigBee basic concepts” ,
http://ftp1.digi.com/support/documentation/html/90001399/90001399_A/Files/XBee-concepts.html. [Acedido em Maio 2015].
- [28] Eclipse, “Windowbuilder” , <https://eclipse.org/windowbuilder/>. [Acedido em Julho 2015].
- [29] Oracle, “JavaFX - The Rich Client Platform” ,
<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/overview/javafx-overview-2158620.html>. [Acedido em Fevereiro 2015].
- [30] M. Jin, N. Bekiaris-Liberis, K. Weekly, C. Spanos e A. Bayen, “Sensing by Proxy: Occupancy Detection Based on Indoor CO2 Concentration,” em *The 9th International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM'15)*, Nice, France, 2015.

- [31] D. Chen, S. Barker e A. Subbaswamy, “Non-Intrusive Occupancy Monitoring using Smart Meters,” em *BuildSys'13 Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings*, Rome, Italy, 2013.